

TEKNIikka JA LIIKENNE

Auto- Ja Kuljetustekniikka

Tuotetekniikka

OPINNÄYTETYÖ

E-RA-sähköauton apurungot

**Työn tekijä: Ilkka Karvonen
Työn ohjaaja: Pekka Hautala
Työn ohjaaja: Harri Santamala**

Työ hyväksytty: __. __. 2010

**Pekka Hautala
Teknologiapäällikkö**



ALKULAUSE

Tämä opinnäytetyö tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoulun Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelmalle. Työn ohjaajina toimivat teknologiapäällikkö Pekka Hautala, sekä projekti-insinööri Harri Santamala.

Työn kohteena on Metropolian E-RA-sähköajoneuvoprojekti. Työn tarkoituksena oli suunnitella ja valmistaa hiilikuitumonokokkiin sopivat apurungot sekä selvittää, miten eri ratkaisuihin on päädytty.

Haluan kiittää projektia tukeneita yhteistyökumppaneita kuten Audi Finland, Ruukki, TTS aikuiskoulutuskeskus, Henry Fordin Säätiö sekä Heltech ammattioppilaitos.

Haluan kiittää talon ulkopuolisia henkilöitä projektin takana, Atso Niemistä ja Martti Holmikäriä. Metropolian henkilökunnasta yliopettaja Matti Parpolaa, teknologiapäällikkö Pekka Hautalaa, E-RA projektinjohtaja Sami Ruotsalaista, projekti-insinööri Harri Santamalaa sekä kaikkia projektissa työskennelleitä opiskelijoita.

Helsingissä 28.8.2010

Ilkka Karvonen

OPINNÄYTETYÖN TIIVISTELMÄ

Työn tekijä: Ilkka Aleksi Karvonen	
Työn nimi: E-RA sähköauton apurungot	
Päivämäärä: 28.8.2010	Sivumäärä: 39 s. + 5 liitettä
Koulutusohjelma: Auto- ja Kuljetustekniikka	Ammatillinen suuntautuminen: Tuotetekniikka
Työn ohjaaja: Teknologiapäällikkö Pekka Hautala Työn ohjaaja: Projekti-insinööri Harri Santamala	
<p>Electric RaceAbout (E-RA) on 2010 valmistunut Metropolia Ammattikorkeakoulun tutkimus- ja kehitystyöprojekti. Projektin tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa kaksipaikkainen sähköurheiluauto opiskelijaprojektina.</p> <p>E-RA on neljällä sähkömoottorilla toteutettu akkusähköauto. Akkuina E-RAssa käytetään litium-titanaattikennoja. E-RAn kori on hiilikuitumonokokki, joka on valmistettu opiskelijatyönä ja jossa materiaalina toimii matalalämpöprepreg -hiilikuitu.</p> <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella, valmistaa ja testata E-RAn monokokkiin asennettavat etu- ja taka-apurungot. Apurunkojen tarkoituksena on olla helpottamassa pyöräntuennan, moottoreiden sekä ohjauksen kiinnittämistä koriin. Apurunkojen tulisi olla mahdollisimman kevyet, mutta riittävän kestävät siirtämään pyöräntuennasta tulevat voimat hiilikuitumonokokkiin. Apurunkojen tulisi olla myös helpot asentaa, jotta tarvittavat huoltotoimenpiteet saataisiin helposti tehtyä.</p> <p>Opinnäytetyössä käydään läpi minkälaisia voimia erilaisissa ajotilanteissa pyöräntuentaan kohdistuu sekä miten voimista aiheutuvat rasitukset näkyvät rakenteissa. Lopuksi on selvitetty, miten työn tavoitteissa on onnistuttu sekä miten autoa on tähän mennessä testattu.</p>	
Avainsanat: Electric RaceAbout, alusta, apurunko	

ABSTRACT

Name: Ilkka Karvonen	
Title: Subframes for Electric Sports Car E-RA	
Date: 28 August 2010	Number of pages: 39 + 5 appendices
Department:	Study Programme:
Automotive and Transport Engineering Automotive Design Engineering	
Instructor: Project Engineer Harri Santamala	
Supervisor: Technology Manager Pekka Hautala	
<p>Electric RaceAbout (E-RA) is a research and development project by Helsinki Metropolia University of Applied Sciences. The target of the project was to design and manufacture a fully electric two-seated sports car, with a team consisting of a number of automotive engineering students and a few faculty members.</p> <p>Specialities of the E-RA -project are: a fully carbon fibre monocoque covering also the front and the rear crash zones, custom made four electric motors designed so that gear-box is not needed, carbon fibre drive shafts, a new type of a can bus (IWS) etc. E-RA will also be registered to road traffic in Finland.</p> <p>This Bachelor's Thesis describes how the steel subframes for the monocoque are calculated, manufactured and tested. The subframes are designed so that they are easy to fit to the body. After all the parts, which become attached to the frames (motors, wishbones etc.) ,have been installed to the frames the frames can be lifted up to the monocoque. Easy installation is designed for the possibility of the serial production of E-RA in the future.</p> <p>The subframes are made of Form 500 and Form 800 steel tubes. The reasons these materials were chosen were that they have quite good strength and they are easy to bend and weld.</p>	
Keywords: Electric RaceAbout, subframe, chassis	

SISÄLLYS

ALKULAUSE	2
OPINNÄYTETYÖN TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	1
1.1 Tausta	1
1.2 Tavoitteet	1
2 E-RA -SÄHKÖURHEILUAUTO	3
3 SUUNNITELUN TYÖKALUT	4
4 APURUNGOT	5
4.1 Vaihtoehdot	5
4.2 Valittu apurunkoratkaisu	5
5 MATERIAALIT	7
6 PALLONIVELIIN VAIKUTTAVAT VOIMAT	8
7 TUKIVARSIEN KIINNITYS	15
7.1 Tukivarsiin kohdistuvat voimat	15
7.2 Tukivarsikiinnikkeiden mitoitusperiaatteet	16
7.3 Materiaali	17
7.4 Tukivarsikiinnikkeiden ja akseliputkien välinen kiinnitys	18
7.4.1 Kierrelitoksen pituus	18
7.4.2 Kierrelitoksen paksuus	19
8 MOOTTORIEN KIINNITYS	20
9 KORIIN KIINNITTÄMINEN	24
9.1 Ruuviliitoksen aksiaalivoima ja asennusmomentti	24
9.2 Kotelorakenteen hyödyntäminen kiinnityksissä	24
10 HAMMASTANKO JA KALLISTUKSENVAKAAJAT	25
11 VALMISTUS JA LAADUN TARKISTUS	26
11.1 Levyjäykisteiden hitsaus	27

11.2	Hitsausnaamojen tarkistus	28
12	SIJOITTAMINEN AUTOON	30
12.1	Alustava kohdistaminen	30
12.2	Kohdistusta Hunter -pyöräkulma mittalaitteen avulla.	31
12.3	Lopullinen kohdistus Caroliner -mittalaitteella.	32
13	TUOTANNOLLISTAMINEN	34
13.1	Progressive Automotive X-PRIZE	34
13.2	Piensarjatuotanto	35
14	YHTEENVETO	37
	VIITELUETTELO	
	LIITTEET	

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

E-RA (Electric RaceAbout) (Kuva 1.) on Metropolia Ammattikorkeakoulun oppilastyönä toteutettu uuden ajan urheiluauto. E-RAn kori on hiilikuitu-monokokki, johon on tehty teräsputkesta apurungot. Polttomoottorin sijasta autoa liikuttaa moderni sähkötekniikka. Jokaisella pyörällä on vetoakselin välityksellä oma reluktanssiavusteinen kestopagneetti tahtimoottorinsa. Auto saa energiansa litium-titanaattiakuista joista sähkö ohjataan inverttereiden kautta moottoreihin. Moottoreista voima välitetään hiilikuidusta valmistettuja vetoakseleita pitkin suoraan pyöriin ilman vaihteita.

Metropolia Ammattikorkeakoulussa on valmistettu sen edeltäjän Stadian aikana jo kaksi Suomen tieliikenteeseen hyväksyttyä B-luokan ajoneuvoa. Vuonna 2000 valmistui urheiluauto RaceAbout, josta myöhemmin on tehty kaksi kehitysversiota RA 02, sekä RA 05. 2006 valmistui kaupunkitaksi City-Cab. E-RA (Electric RaceAbout) on tavallaan jatkokehitystä RaceAbout polttomoottoriversiosta. RaceAbout tulee toimimaan referenssinä E-RAn ratatesteissä, kunhan E-RAa päästään kunnolla testaamaan. RaceAboutissa olevasta Motec -tiedonkeruuhjelmasta on myös kerätty dataa, jota on käytetty E-RAn suunnittelussa.

E-RA on myös kilpa-auto, jolla osallistutaan Yhdysvalloissa järjestettävään Progressive Insurance of Automotive X-Prize -kilpailuun. Kilpailun ajankohta on kesä 2010 ja E-RA on ainoa pohjoismainen auto koko kilpailussa. Kilpailun pääpalkintona on 10 miljoonaa dollaria, joka jaetaan kolmelle eri sarjalle.

1.2 Tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella, valmistaa ja testata E-RA –sähköautoprojektiin tulevat apurungot. Apurungot ovat helpottamassa tukivarsien, sähkömoottoreiden, hammastangon, rattiakselin sekä kallistuksenvakaajien kiinnittämistä. Hiilikuituun kyseisten komponenttien kiinnitys suoraan olisi ollut todella haasteellista, sillä hiilikuitu murtuu helposti, jos sitä kuormitetaan pieneltä alueelta. Apurungot on myös suunniteltu niin, että kaikki siihen kiinnittyvät osat voidaan koota pöydällä ja nostaa koko paketti sellaisenaan autoon kiinni. Kori ja apurungot on siis mahdollista valmistaa eri

paikoissa ja vain kokoonpanovaiheessa liittää toisiinsa. Tämä helpottaa projektin taustalla ollutta ajatusta ERAn tuomisesta sarjatuotantoon.



Kuva 1. Juha Raution hahmotelma E-RAn muotoilusta kesällä 2008.

2 E-RA-SÄHKÖURHEILUAUTO

Ajatus urheilullisesta sähköautosta tuli vanhoilta RAn (RaceAbout) tehneiltä Insinööreiltä jo vuonna 2006. Heidän ideansa oli muuttaa vanha RA sähkömoottoreilla toimivaksi akkusähköautoksi. Ajatusta lähdettiin kehittämään ja hyvin nopeasti huomattiin, että vanha RA olisi jäänyt liian pieneksi. E-RA on kasvanut RAn mitoista leveyttä 35 mm ja pituutta 380 mm. Lisäksi ns. "Design from a scratch" eli kokonaan uuden auton suunnittelu, antoi vapauksia suunnitella tilankäyttö uudestaan. CityCabin onnistuneen hiilikuitukorin takia ajatus valmistaa hiilikuitumonokokki tuntui järkevältä. Akkujen sekä muun korkeajännitetekniikan massa on vielä tänä päivänä niin suuri, että suoritusrakojen nimissä auton paino oli pidettävä kurissa kaikilta muilta osin. Hiilikuiturunkoon päätettiin tehdä osien kokoamista ja kiinnittämistä varten pienet apurungot.

Auton suunnittelussa on alusta asti pidetty periaatteena käyttää mahdollisimman paljon jo olemassa olevia osia. Tämän päivän monet pienet erikoisautotehtaat käyttävät paljon isojen konsernien valmiita osia. Se on sekä kustannussyistä että työmäärän kannalta järkevää. Nykypäivänä myös materiaalitekniikka ajoneuvoissa on kehittynyt niin valtavasti, että valmiina saatavat osat ovat sekä kestäviä että kevyitä. Tästä syystä mm. tukivarsien ja olkakseleiden itse valmistaminen ei ollut tässä tapauksessa järkevää.

Autoon haluttiin päällekkäiskolmiotukivarsijousitus (engl. Double Wishbone). Sellaisten komponenttien löytäminen valmiina osoittautuikin erittäin haastavaksi, sillä nelivetoisia autoja kyseisellä jousituksella ei juuri ole. Audi R8 on varustettu kyseisellä jousituksella ja Audi Finland oli halukas lähtemään projektiin mukaan lahjoittamalla tarvittavat osat autoon.

3 SUUNNITELUN TYÖKALUT

Koko auton suunnittelu on tehty käyttäen apuna Dassault Systems: n Catia V5R17 3D -mallinnusohjelmaa. Auton muotoilu on suunniteltu Rhino Service 3D -ohjelmalla ja muotoilusta vastasi Lahden ammattikorkeakoulu. Lujuuslaskelmat on tehty Algorin FemPro sekä Dassault Systemsin Abaqus –lujuuslaskentaohjelmilla. Cnc (Computer Numerical Controlled) -koneistettujen osien työstöradat on tehty Surfcam ja Mastercam -ohjelmien avulla. Alusta voimien simulointi on tehty MSC Adams -ajosimulointiohjelmaa käyttäen.

4 APURUNGOT

4.1 Vaihtoehdot

Suunnittelun alkuvaiheessa pohdittiin pitkään eri vaihtoehtoja apurunkojen suhteen. Tuotantoautoissa yleisesti käytössä olevat apukelkat eivät moottorien pyöreään muodon sekä osien kalliiden työkustannusten takia olleet mahdollisia, ja siksi ajatus hylättiin heti alkuvaiheessa (Kuva 2). Teräsputkikehikon korvaaminen suoraan koriin liitetyillä hiilikuitupalkeilla oli pitkään vahvana vaihtoehtona, mutta juuri moottoreiden ja tukivarsien kiinnityskohtien suuret rasitukset ajoivat teräsputkikehikoihin.



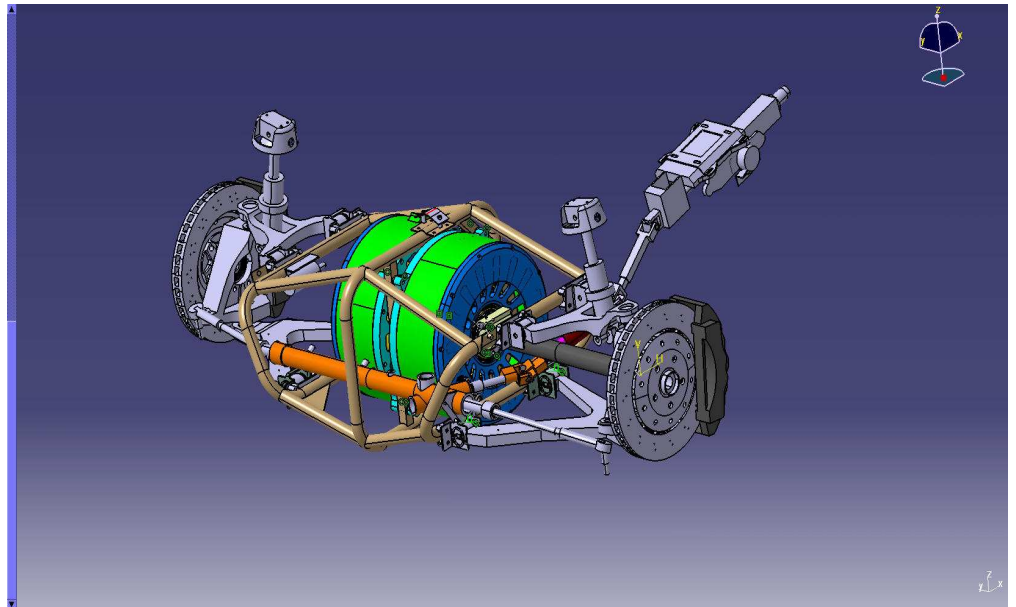
Kuva 2. Tuotantoautolle tyypillinen akselikelkka.

4.2 Valittu apurunkoratkaisu

Kaarien putket oli tarkoitus taivuttaa siten, että ne vaatisivat vain kaksi hitsausaamaa. Ulkopuolisella yrityksellä teetetyt taivutukset eivät valitettavasti vastanneet lähellekään haluttuja toleransseja, jotka ovat tässä autossa olleet varsin tiukat. Vaikean saatavuuden takia putket jouduttiin katkaisemaan, ja näin kaarissa on jokaisessa neljä saamaa. Toinen syy miksi putket haluttiin taivuttaa, oli se, ettei mahdollisiin kulmiin tulisi jännityshuippuja (Kuva 3).

Aluksi tukivarsien kiinnityksen piti tapahtua alumiinista koneistetuilla kiinnikkeillä, jotka oli tarkoitus pultata putkiin läpipulteilla. Ajatus kuitenkin hylättiin nurjahdusvaaran takia. Audi R8n tukivarsien puslat vaativat nimittäin melko

pitkän kiinnikkeen. Suoraan putkeen hitsattuja levykiinnikkeitä, jollaiset löytyy vanhasta RAsta, suunniteltiin pitkään. Levykiinnikkeet eivät kuitenkaan olisi antaneet mitään säätövaraa hitsauksen jälkeen ja hitsaussaumaan olisi tullut leikkausjännitystä. Audin kiinnikkeitä käytettäessä säätövara camber-suuntaan alatukivarsissa on noin 10mm.



Kuva 3. CAD-malli etuapurungosta ja siihen liittyvistä osista.

5 MATERIAALIT

Tarkoitukseen sopivat putket löytyivät Ruukin valikoimasta ja ovat laadultaan Form 500- ja Form 800 -terästä (ks. liite 4). Form 500 -teräksessä myötöraja on 400 MPa ja murtoraja 500 MPa. Form 800 -teräksessä myötöraja on 600 Mpa ja murtoraja 800 Mpa. Putkien ulkohaisija on 32 mm ja seinämäpaksuus 2 mm. Näiden arvojen riittäminen todettiin FEM-lujuuslaskentaohjelman avulla. Ruukin valikoimasta olisi löytynyt putkia joiden murtolujuus olisi ylettänyt aina 1000 Mpa, mutta todella lujia putkia on vaikea saada sekä työstää ja itse asiassa Form 500:n hankkiminen osoittautui tarpeeksi hankalaksi.

Putkien hitsaukseen käytettiin Esab OK tigrod 12.64 -lisäainetta, jonka myötöraja on 480 Mpa ja murtoraja 620 Mpa (ks. liite 6). Arvot siis vastaavat hyvin Form 500 -putkea.

Audilta tulleiden tukivarsikiinnikkeiden ja putkien väliin koneistetut kiinnikkeet on valmistettu Sf 355 -teräksestä. Kiinnikkeet on hitsattu putkiin Esab OK Autorod 12.64 MAG -langalla (ks. liite 7), jonka arvot ovat samat kuin edellä mainitussa tigrodissa.

Levyjäykisteet ovat LITEG RAGAL 800DPF (ks. liite 5) suurlujuusterästä, jonka myötöraja on 500 MPa murtoraja on 800 MPa ja paksuudeltaan 1,35 mm. Jäykisteet on hitsattu putkikehikkoon Esab OK autorod 13.29 MAG -langalla (ks. liite 8), joka on tarkoitettu erityisesti lujien ja suurlujien terästen liittämiseen. Myötörajaksi kyseisellä langalla on ilmoitettu 710 MPa ja murtorajaksi 780 MPa.

Tukivarret kiinnittyvät edellä mainittuihin kiinnikkeisiin Audi R8:sta peräisin olevilla tukivarsikiinnikkeillä.

6 PALLONIVELIIN VAIKUTTAVAT VOIMAT

Lujuuslaskennassa on käytetty apuna kahta eri tietokoneohjelmaa. Ohjelmia varten jouduttiin kuitenkin käsin laskemaan palloniveliin vaikuttavat voimat, kuvitellun pahimman mahdollisen tilanteen mukaan. Tukivarsivoimien hahmottamista vaikeutti myös se, ettei auton tulevaa massa voitu tarkkaan määrittellä. Apurunkojen suunnittelu piti saada päätökseen paljon ennen kuin esimerkiksi akkujen massaa osattiin sanoa.

Suoralla jarrutuksessa arvioitiin hidastuvuuden yltävän 1,5 kertaa putoamiskiihtyvyyteen: $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$. Mutkaan ajettaessa asetettiin koko etuakselipainon ulommalle pyörälle. Kuviteltu pahin mahdollinen tilanne on siis se, että molemmat, sekä pitkittäinen että sivuttainen voima vaikuttavat maksimiarvoillaan alustaan. Myöhemmin tässä työssä todetaan, ettei edellä mainittua tilannetta ole käytännössä mahdollista saavuttaa.

E-RAn pyöränripustus on suurimmalta osalta peräisin Audi R8 -mallista ja siksi alustaan kohdistuvien voimien laskennassa on käytetty vertailuna kyseistä automallia. Audi R8 pysähtyy rataolosuhteissa jarrutettaessa 60 mph nopeudesta (96,6km/h) 35 metrin matkalla [4]. Kiihtyvyydeksi voidaan tällöin laskea [3, s.47 (3-6)]

$$SD = \frac{v_0^2}{2 * D_x} \Rightarrow D_x = \frac{v_0^2}{2 * SD} = \frac{(96,6 \frac{km}{h})^2}{2 * 35m} = \frac{720,03(\frac{m}{s})^2}{70m} = 10,286.. \approx 10,29 \frac{m}{s^2}$$

missä:

SD = pysähtymismatka

V_0 = aloitusnopeus

D_x = pysähtymiskiihtyvyys

Kiihtyvyyden arvoksi saadaan siis $1,05 * g$. Jarrutustilanteessa autoon kohdistuu myös ilmanvastuksesta johtuva hidastava voima, vierinvastusvoima sekä laakerihäviöt, mutta ne ovat suuruusluokaltaan lähes mitättömiä. Toisaalta jarrutuksessa kitkakerroin ei ole koko ajan yhtä suuri eikä tienpinta

täysin tasainen, joten alustaan tulee dynaamista kuormitusta. Siitä syystä varmuuskerroin 1,5 on hyvä olla.

Skidpadissa eli vakioympyräkokeessa, jossa autoa ajetaan vakiohalkaisijalla ($D = 61$ metriä) olevaa ympyrärataa ympäri, R8:lla saavutetaan sivuttaiskiihtyvyyden arvoksi $0,96 * g$ [4]. E-RA; n suunnitellussa sivuttaiskiihtyvyyden on oletettu olevan $1 * g$.

E-RA; n suunniteltu painojako on 45 % edessä ja 55 % takana. SuSprog 3D -simulointiohjelmasta todettiin, että jarrutuksessa dynaaminen painonsiirto lisää etuakselin kuormaa 160 kg. Dynaaminen painonsiirto on vähäistä verrattuna muihin autoihin erittäin matalan painopisteen ansiosta. Laskennassa käytetty kokonaismassa on 1400 kg. Suoralla jarrutettaessa paino etuakselin yhdellä pyörällä on siis:

$$m_e = \frac{0,45 * 1600kg + 160kg}{2} = 440kg$$

Pyörän maahan kohdistama painovoima $1g$; n kiihtyvyydellä on silloin

$$G_e = 440kg * 9,81 \frac{m}{s^2} \approx 4316,4N$$

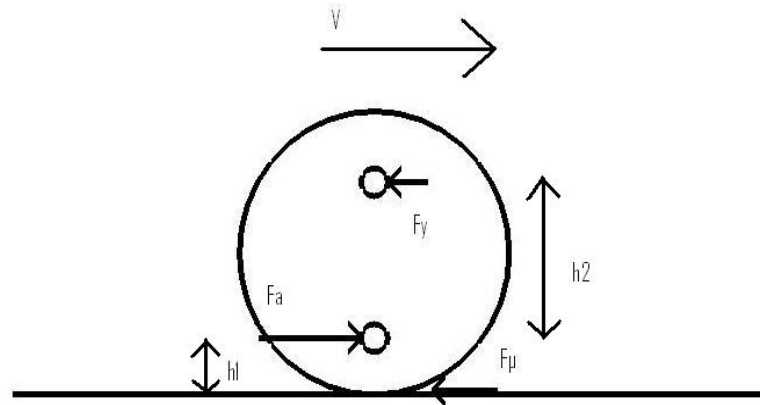
Kitkan ollessa parhaimmillaan eli auton juuri lähtiessä luistoon voidaan kirjoittaa [3, s.35 (2-13)]

$$F_{\mu_{1G}} = \mu * G_e$$

Koska jarrutustilanteessa on oletettu kiihtyvyyden yltävän $1,5 * g$, saadaan:

$$F_{\mu} = F_{\mu_{1G}} * 1,5 = 4316,4N * 1,5 \approx 6474,6N$$

Momentti- ja tasapainoyhtälöiden avulla saadaan ala- ja ylätukivarsiin vaikuttavat voimat F_a ja F_y (Kuva 4).



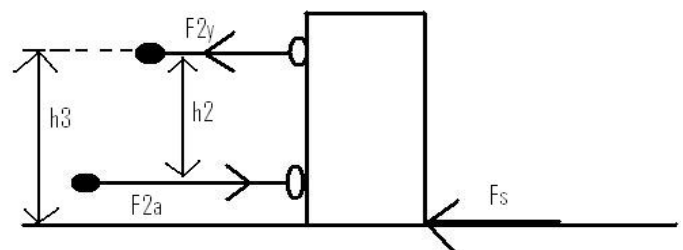
Kuva 4. Jarrutuksesta johtuvat voimat sivusta katsoen.

$$\sum M = 0 \Rightarrow F_{\mu} * h_1 = F_y * h_2 \Rightarrow F_y = \frac{h_1}{h_2} * F_{\mu} = \frac{181,3\text{mm}}{262,6\text{mm}} * 6747,6\text{N}$$

$$F_y \approx 4470\text{N}$$

$$\sum F = 0 \Rightarrow F_a = F_{\mu} + F_y = 6747,6\text{N} + 4470\text{N} = 11217,7\text{N}$$

Kaarreaajotilanteessa tukivarsiin kohdistuvat voimat ratkaistaan samoja mekaniikan kaavoja käyttäen. Painonsiirto on myös oletettu niin, että kaikki etupään massa siirtyy uloimmalle renkaalle (Kuva 5).



Kuva 5. Kaarreaajotilanteessa syntyvät voimat edestä katsottuna.

$$F_s = 9,81 \frac{m}{s^2} * 880kg = 8632,8N$$

$$\sum M = 0 \Rightarrow F_{2y} * h_2 = F_s * (h_3 - h_2)$$

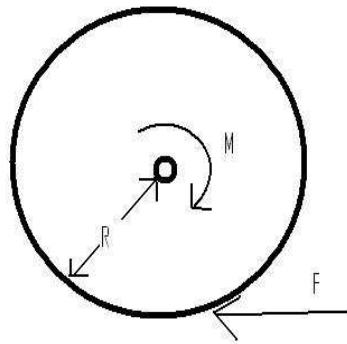
$$\Rightarrow F_{2y} = \frac{h_3 - h_2}{h_2} * F_s = \frac{443,9 - 262,6mm}{262,6} * 8632,8N$$

$$\Rightarrow F_{2y} \approx 5960,1N$$

$$\sum F = 0 \Rightarrow F_{2a} = F_{2y} + F_s = 5960N + 8632,8N = 14592,8N$$

Takapään laskennassa on käytetty samoja voimia erimerkkisillä etumerkeillä. Tilanne takapäässä on turvallisesti ylimitoitettu, sillä moottorit pystyvät tuottamaan vain noin puolet siitä voimasta, joka jarrutettaessa saavutetaan.

Yhden moottorin maksimivääntömomentti on noin 800Nm. Kytöntä, vaihteistoja ja alennusvaihteita E-RA:ssa ei ole. Näillä tiedoilla voidaan laskea [3, s. 25 - 26] suurpiirteittäin renkaalle tuleva työntövoima (Kuva 6). Laskennassa ei ole huomioitu vetoniveltien ja moottorin häviöitä, sekä vetoakselin ja renkaan hitausmomenteja.



Kuva 6. Moottorilta tuleva vääntömomentti.

Käytettävä rengastus on 225/45 R18, josta saadaan pyörän säteeksi:

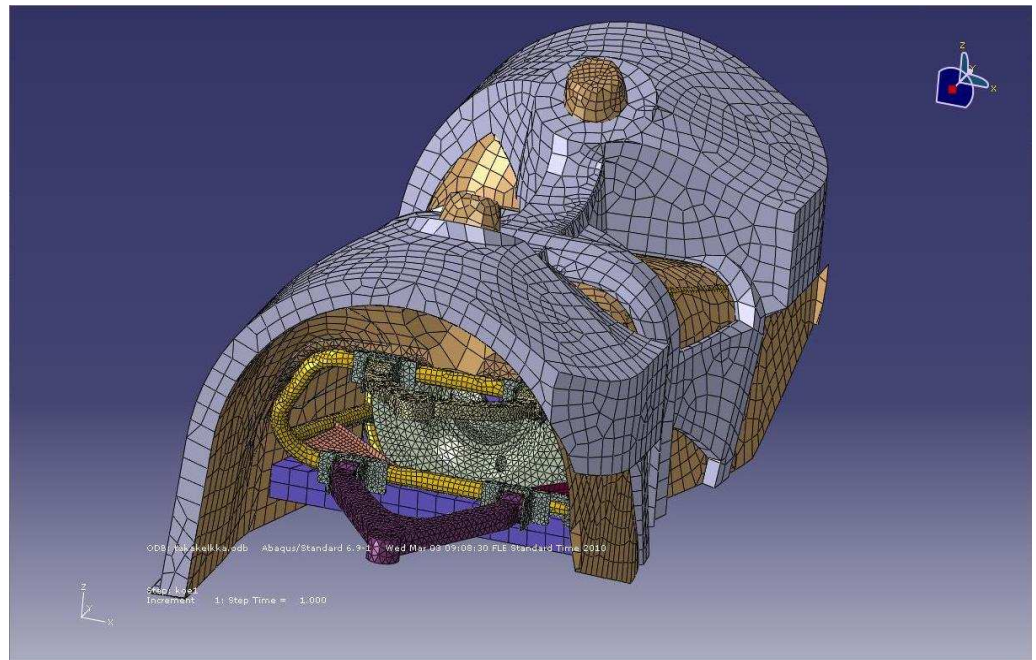
$$R = \frac{18''}{2} + 0,45 * 225\text{mm} = 228,6\text{mm} + 101,25\text{mm} = 329,85\text{mm} \approx 0,33\text{m}$$

Vääntömomentin kaavasta $M = F * s$ saadaan työntövoima ratkaistua seuraavalla tavalla:

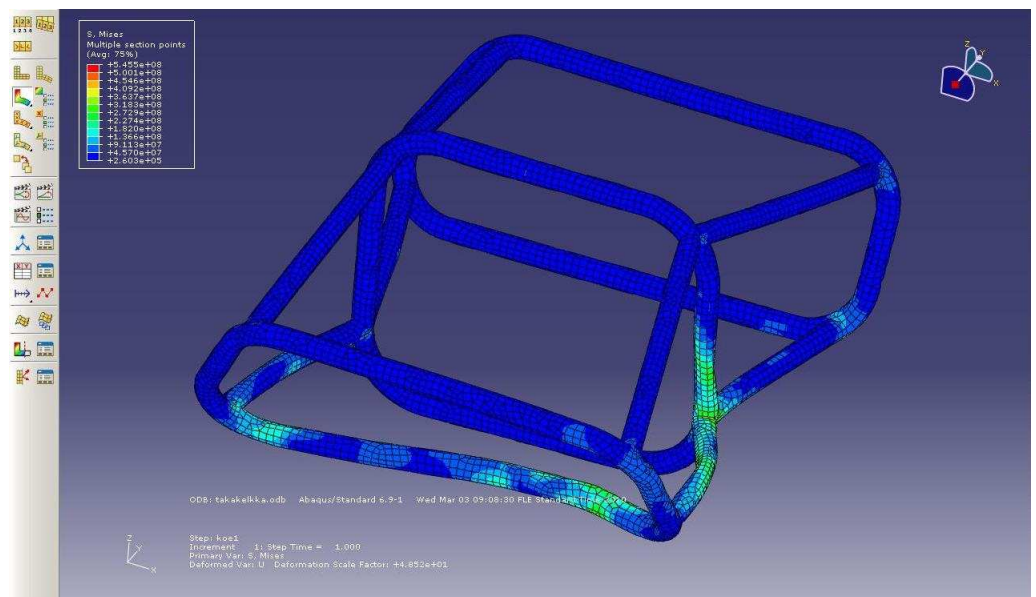
$$F = \frac{M}{s} = F = \frac{M}{R} = \frac{800\text{Nm}}{0,33\text{m}} = 2424,24\text{N} \approx 2400\text{N}$$

Vaikka laskenta on suurpiirteinen, saadaan laskusta työntövoiman suuruusluokka ja voidaan todeta, että jarrutuksessa voimat ovat huomattavasti suurempia.

Ohessa laskentakuva takapään voimista kiihdytyksen aikana (Kuva 7). Laskennassa on käytetty jarrutustilanteessa laskettua 6,5 kN kitkavoimaa, koska etu- ja takapään apurungot ovat valmistettu samoista materiaaleista ja on rakenteeltaan hyvin samanlaisia. Kuvassa 7 näkyvä laskentamalli on hyvin työläs tehdä ja käsitellä joten kyseisestä laskentamallista saatua informaatiota on käytetty myös etupään mitoituksessa. Kuvassa 8 on edellä mainitusta tilanteesta syntyvät rasitukset apurunkoon.



Kuva 7. Takapään FEM-malli.



Kuva 8. Takapään apurunkoon tulevat jännitykset.

Edellä esitetyistä kuvista voi huomata, että alatukivarsien kiinnikkeisiin kohdistuu huomattavasti suuremmat jännitykset kuin ylätukivarsien. Jännityshuippujen pienentämiseksi kiinnikkeiden taakse suunniteltiin erikoislujasta 1,35 mm -paksuisesta teräslevystä kantatut levyjäykisteet (ks. liite 5).

Vertailukohteeksi alla on esitetty RA:lla ajettun Motec -tiedonkeruujärjestelmän tallentamat tulokset kiihtyvyyksistä. Tiedot perustuvat 2008 lokakuussa ajettuun ajosykliin Alastaron moottoriradalla, jossa autolla haettiin hyvää kierrosaikaa. Rengaskitkasta ei luonnollisesti ole tarkkaa tietoa, mutta kiihtyvyyssmittarin tulokset on esitetty oheisessa taulukossa.

Taulukko 1. Raceaboutilla saavutetut kiihtyvyydet rata-ajossa.

Kiihtyvyys	Pitkittäis-suunta	poikittais-suunta
Max. Pitkittäinen	1,04g	0,08g
Max. Poikittainen	0,08g	1,25g
Max. Yhdessä	0,44g	0,62

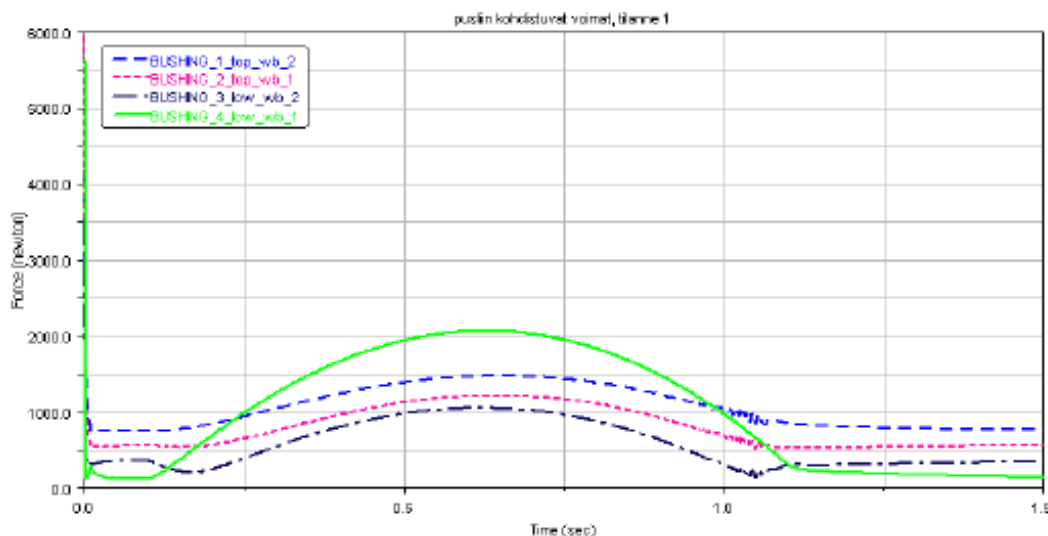
Taulukossa 1 olevat kiihtyvyyssarvot kertovat RAn jousitetun massan kiihtyvyydet. Korin kallistelu, nyökkäys sekä niaus on siis mukana kyseisissä tuloksissa. Taulukosta nähdään myös, että molemmat kiihtyvyydet eivät vaikuta laskelmissa käytetyn maksimin voimakkuudella. Myöskään molemmat kitkat eivät kitkaympyräteorian [2, s. 58] mukaan voi vaikuttaa arvolla yksi. Idealisoitu pahin mahdollinen tilanne on siis turvallisesti ylimitoitettu.

7 TUKIVARSIEN KIINNITYS

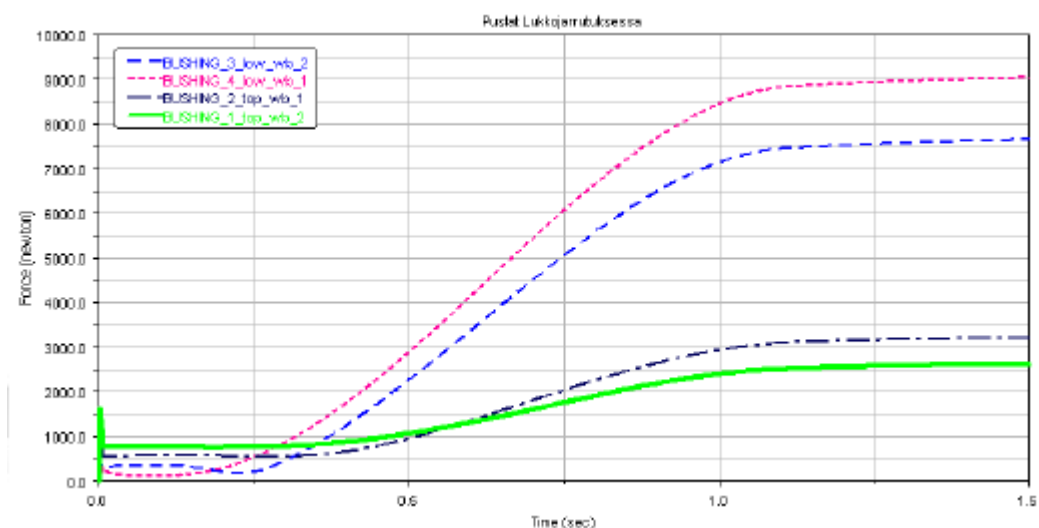
7.1 Tukivarsiin kohdistuvat voimat

Auton alustaan kohdistuvien voimien laskeminen lineaarisesti käsin on usein hyvin suurpiirteistä. Tämä johtuu siitä, että esimerkiksi E-RAn tapauksessa jokaisesta pyöräripustuksesta löytyy neljä kumista puslaa, kolme palloniveltä (mukaan lukien raidetangonpäät) sekä jousi ja iskunvaimennin. Kaikki edellä mainitut asiat sotkevat yksinkertaista laskemista, jossa oletetaan voimien tulevan renkaalta suoraan auton runkoon, ilman vaimennusta. Iskunvaimenninta lukuun ottamatta nämä edellä mainitut komponentit vaimentavat voimia pyörältä runkoon, eli käsin lasketut tulokset ovat suurempia kuin todelliset voimat. Apurunkojen suunnitteluvaiheessa lujuuslaskenta perustui täysin lineaariseen laskentaan eli kaikkien nivelten oletettiin olevan jäykkiä. Tämä johtui osaksi aikataulusta, mutta myös siitä, että taitoa kumiosien lujuuslaskennasta ei koulultamme siihen aikaan löytynyt. FEM-ohjelmista tulleet suurimmat jännityshuippuja ei siis otettu huomioon. Myöhemmässä vaiheessa projekti-insinööri Harri Santamala teki E-RAn alustageometrialla olevan Adams-mallin, jossa simuloidaan renkaan pysähtymistä ja siitä syntyvien voimien vaikutusta tukivarsikiinnikkeisiin (Kuva 9 ja Kuva 10). Poiketen käsinlaskennasta Adams-mallissa on huomioitu muun muassa seuraavia asioita:

- renkaan hidastuvuus sekunnissa pyörimisnopeudesta 2000 rpm nol-
laan
- jarrutustilanteessa tapahtuva renkaan jousto.
- kumipuslissa tapahtuva jousto.



Kuva 9. Tukivarsien pusliin tulevat voimat 1 sekunnin hidastuvuudella.



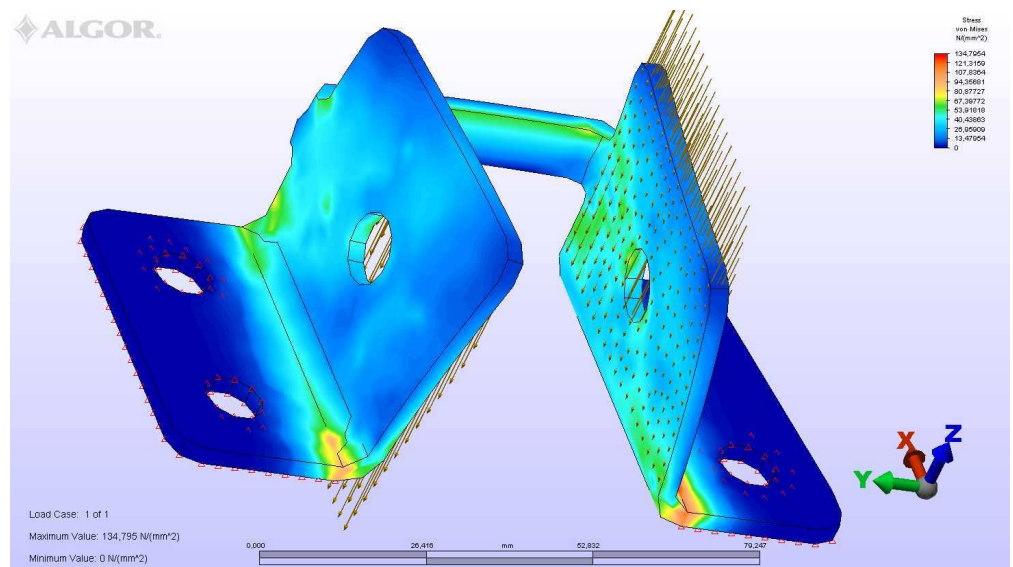
Kuva 10. Tukivarsien pusliin tulevat voimat, kun pyörät lukittuvat heti.

Kuva 9, osoittaa, että huomioitaessa renkaan hidas lukkiutuminen sekä kumiosien jousto, alustaan kohdistuvat voimat pienenevät merkittävästi verrattuna siihen, että kaikki nivelet ovat jäykkiä ja pyörä lukkiutuu ajan hetkellä nolla. E-RA:lla tullaan tekemään myöhemmin venymäliuskamittaukset, joiden avulla toivottavasti saadaan selvitettyä, kuinka tarkka edellä osoitettu simulaatio todellisuudessa on.

7.2 Tukivarsikiinnikkeiden mitoitusperiaatteet

Tukivarsien kiinnityksessä käytettiin Audi R8 -mallista peräisin olevia tukivarsikiinnikkeitä. Kyseisiä kiinnikkeitä ei kuitenkaan suoraan voitu käyttää pyöreään putkeen, joten niiden ja putken väliin oli tehtävä erilliset välikappaleet.

Audi R8 painaa 1560 kg, mikä on hyvin lähellä E-RAn painoa. Voitiin siis olettaa, että Audilta tulleet tukivarsikiinnikkeet kestävät laskettujen jarrutusvoimien kuorman. E-RAn taka-akselistossa raidetangon kiinnityspistettä halettiin jousitusgeometrian takia muuttaa ja siksi Audin raidetangonkiinnike ei käynyt sellaisenaan. Raidetangon kiinnitys päätettiin tehdä itse ja sitä varten selvitettiin miten Audin kiinnikkeet on mitoitettu. Kuvassa 11, on esitetty FEM-analyysi, jossa Audin tukivarsikiinnikettä rasitetaan 9000 N:n voimalla. Jännityshuippu kyseisellä voimalla on 135 MPa eli noin kolmasosa Sf355 -teräksen myötölujuudesta.



Kuva 11. Audin tukivarsikiinnikkeen FEM-kuva, kun kiinnikettä rasitetaan 9000N voimalla.

7.3 Materiaali

Metropolia Ammattikorkeakoulun materiaalitekniikan laboratoriossa mitattiin Audilta saadun tukivarsikiinnikkeen Vickers-kovuus. Mittaaminen tapahtuu siten, että tylppäkärkistä timanttikartiokärkeä painetaan kappaletta vasten noin 10 sekuntia. Mittauskertoja tehdään useampi ja niiden aiheuttamien kuvioiden koon keskiarvo merkitään muistiin. Kovuus saadaan jakamalla painetun massan arvo syntyneen kuvion koolla. Tässä tapauksessa Vickers-kovuudeksi saatiin noin 250, joka vastaa austeniittistä terästä. Materiaalin selvittäminen tehtiin siksi, että taka-apurunkoon tulevat raidetangon kiinnikkeet tehtiin itse ja materiaalin haluttiin olevan lähellä Audin kiinnikkeiden materiaalia. Raidetangon kiinnikkeet päätettiin valmistaa Sf355 -teräksestä.

7.4 Tukivarsikiinnikkeiden ja akseliputkien välinen kiinnitys

Tukivarsien ja -kiinnikkeiden väliin tulevien kappaleiden suunnittelussa piti heti aluksi ottaa huomioon valmistus. Autoon tarvittiin 16 kappaletta kyseisiä osia ja niiden koneistus tuli antaa oppilaitoksen konelaboratorion hoidettavaksi. Metropolian CNC -jyrsin oli tuolloin vielä kolmeakselinen, mikä rajoitti hieman kappaleiden suunnittelua. Alun perin kappaleiden läpi piti porata kymmenen millimetrin halkaisijalla oleva reikä, joka olisi keventänyt jokaista kiinnikettä 16 grammaa. Tämä olisi kuitenkin vaatinut yhden akselin lisää tai vähintään yhden kiinnityksen enemmän, joten se jätettiin tekemättä.

7.4.1 Kierrelitoksen pituus

Hyvin vetoa kestävän kierrelitoksen, jossa käytetään 8.8-lujuusluokan ruuveja, minimipituudeksi l suositellaan [1, s. 186] seuraavaa:

$$l = 0,9 d, \text{ kun } d/P < 9$$

$$l = 1,2 d, \text{ kun } d/P > 9$$

missä l = kierteen minimipituus

P = nousu

d = pulttikierteen ulkohalkaisija

d/P = kierteen hienous.

Tässä tapauksessa saadaan siis

$$P = 1,25 \text{ mm},$$

$$d = 8 \text{ mm}$$

$$d/P = 6,4$$

Minimipituudeksi kierteelle siis saadaan $l = 0,9 \cdot 8 \text{ mm} = 7,2 \text{ mm}$.

Kierrettä siis jätettiin 7,5 mm ja loppuosa reiästä porattiin suuremmaksi. Tällä tavalla säästettiin apurunkojen painossa noin 230 grammaa.

7.4.2 Kierrelitoksen paksuus

Kierteen ulkopuolelle jäävän materiaalin minimihalkaisijaksi suositellaan terästä käytettäessä [1, s.186] seuraavaa:

$s/d \geq 1,7$, jossa

s on ulkopuolelle jäävän materiaalin halkaisija ja

d on kierteen nimellishalkaisija.

Tässä tapauksessa materiaalia kierteen ympärille piti siis jäädä $1,7 \cdot 8 \text{ mm} = 13,6 \text{ mm}$ ja loput voitiin viistää pois. Tällä tavoin apurunkojen painossa säästettiin noin 700 grammaa.

8 MOOTTORIEN KIINNITYS

Yksi merkittävä tekijä, joka mahdollistaa niinkin ohuiden ja kevyiden putkien käytön, oli moottorin rungon ottaminen mukaan apurungon jäykistämiseen. Moottorit on tuettu neljästä kohdasta apurunkoon, mikä tukee runkoa merkittävästi. Moottoreiden ulkokuori on tehty Alumec-luokan alumiinista ja ulkohalkaisija vastaa hyvin lähelle apurunkojen keskikaaren halkaisijaa.

Moottorien kiinnityksen ruuviliitokseen haluttiin luonnollisesti veto- ja puristusjännitystä eikä mahdollista leikkausjännitystä, jota voisi syntyä moottorin tuottamasta vääntömomentista. Moottoreiden kiinnityksen laskennassa käytin myös hieman suurempaa varmuuskerrointa. Moottoreiden ulkokuoret on koneistettu yhdestä aihioista ja siksi mahdolliset jälkikäteen tehtävät muutokset olisivat todella kalliita ja työläitä. Moottorit kiinnitetään runkoon M8 * 1,25 * 100 10.9 ruuveilla ja kaavassa 1 on laskettu niiden tuottama aksiaalinen kiristysvoima. [1, s. 228 - 232].

Kaava 1.

$$F_{sp} = \sigma_M * A_s$$

$$A_s = 36,6mm$$

$$\sigma_M = \frac{v_p * R_{p0,2}}{\sqrt{1 + 3[2 \frac{d_2}{d_0} (1,155\mu_G + \frac{P}{\pi * d_2})]^2}}$$

$$F_{sp} = \frac{0,9 * 900 \frac{N}{mm^2}}{\sqrt{1 + 3[2 \frac{7,188mm}{6,647mm} (1,155 * 0,135 + \frac{1,25mm}{\pi * 7,188mm})]^2}} * 36,6mm = 23246,29N$$

$$\approx 23200N$$

Kitkakerroin moottorin ja pultin pinnan välillä on oletettu olevan 0,15, josta saadaan laskettua maksimaalinen kitkavoima pulttiliitokselle :

$$F = 0,15 * 23200N = 3480N$$

Moottorin vääntömomentin, joka suunnittelun tässä vaiheessa odotettiin olevan 800 Nm, aiheuttama voima pulttiliitokseen saadaan moottorin säteen kaavasta 2 seuraavasti:

Kaava 2.

$$F = \frac{M}{r} = \frac{800Nm}{0,225m * 4} = 888,888 \approx 890N ,$$

missä r on moottorin säde ja

M moottorin tuottama vääntömomentti.

Kaavoista 1 ja 2 saadaan siis varmuuskerroin pulttiliitoksen riittämiseksi

$$\text{moottorin vääntömomentille: } n = \frac{3480N}{890N} = 3,91 \approx 4$$

Moottorin massa kuormittaa myös moottorin kiinnikkeitä. Tässä tapauksessa mahdollista kuoppaan ajamista on simuloitu siten, että moottorit kohdistavat kaksi kertaa G:n suuruisen kiihtyvyyden aiheuttaman voiman kiinnikkeisiin. Tällöin kaikkia neljää pulttiliitosta kohtaan kaksi moottoria aiheuttaa seuraavanlaisen voiman $\sum G$

$$\sum G = 2 * 50kg * 2 * 9,81 \frac{m}{s^2} = 1962N$$

Yhdelle pulttiliitokselle tulee siis noin 50kg:n kuorma. Pulttiliitoksen varmuuskerroin momentin aiheuttamista jännityksistä on kuitenkin niin suuri, että 500 N:n lisäys ei riko liitosta.

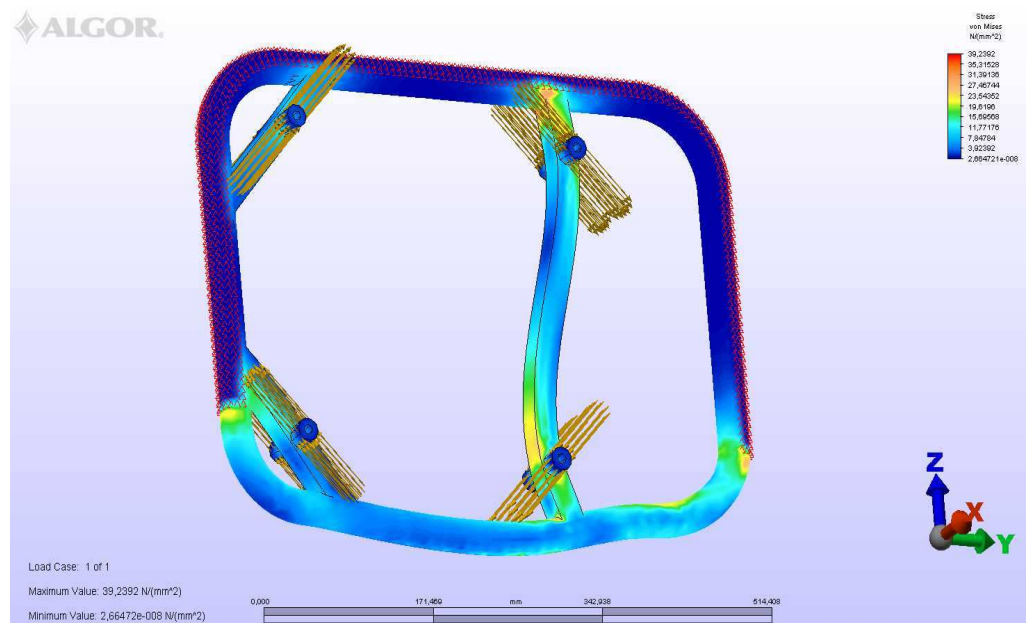
Jotta tarvittava kiristysvoima saavutetaan, on kiristysmomentti laskettu seuraavasti [1, s. 230 - 234]

$$D_{km} = \frac{d_k + D_B}{2} = \frac{(13 + 7,35)mm}{2} = 10,175mm$$

$$\begin{aligned}
 M_a &= 0,5 * Fm * (11,55\mu_G * d_2 + \mu_k D_{km} + \frac{P}{\pi}) \\
 &= 0,5 * 23200N * (1,155 * 0,135 * 7,35mm + 0,135 * 10,175mm + \frac{1}{\pi}) \\
 &= 37467...Nmm \\
 &\approx 37Nm
 \end{aligned}$$

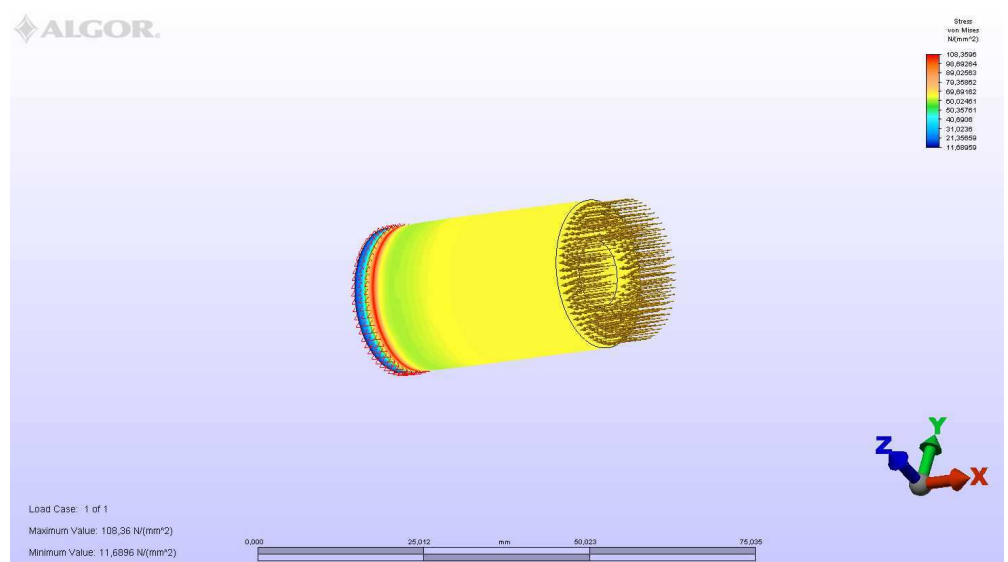
Moottorit tulee siis asentaa momenttiavaimella noin 35 Nm:n asennusmomenttiin.

Oheisessa kuvassa (Kuva 12) on simuloitu Algor-lujuuslaskentaohjelmalla yhden moottorin väännöstä aiheutuvat rasitukset apurungon keskiputkeen. Laskentamallin helpottamiseksi moottori ja muu runko on piilotettu. Moottorin kiinnikkeisiin on liitetty kuhunkin 2 * 890N suuruinen kehäsuuntainen voima (kuvassa keltaiset nuolet). Kehikko on tuettu punaisilla pisteillä näkyvistä kohdista. Moottorin kiinnikkeiden materiaalina on käytetty Form 800 -terästä jonka myötöraja on 600 Mpa. Simulaatiossa suurimmat jännitykset ovat 40 Mpa, joten ongelmia tästä ei synny. Laskentasimulaatiosta puuttuu vielä moottorin massasta aiheutuvat jännitykset, mutta varmuuskerrointa myötörajaan on niin reilusti, että kyseisen asian tarkastaminen lienee turhaa.



Kuva 12. Moottorin väännöstä johtuvat rasitukset auton etuapurungossa.

Moottoreita ei ollut vielä valmistettu siinä vaiheessa, kun apurunkoihin piti hitsata niitä varten kiinnikkeet. Reikien jaon kohdilleen osumiseksi, tehtiin jyrsimellä 4 mm:n alumiinilevystä kaksi kohdistuslevyä, joissa reiät olivat muutaman sadasosamillimetrin tarkkuudella samat kuin tulevilla moottoreilla. Näiden levyjen avulla kokeiltiin myös jokaisen hitsauksen jälkeen, että reiät olivat kohdallaan. Moottorin kiinnikeputkiin koneistettiin myös holkit reikien kohdille, jotta moottorit saatiin halutulle kohdalle auton leveyssuunnassa. Holkit sorvattiin Sf355-teräksestä ja ovat ulkohalkaisijaltaan 22 mm. Holkeissa oleva reikä on 10 mm, jotta moottorit olisi helpompi asentaa. Ruuviliitos ei kanna leikkaussuunnassa voimia, joten 2 mm isompi reikä verrattuna ruuviin ei huononna liitosta. Liitoksessa olevassa holkissa oli kuitenkin vaarana, että se painuu kasaan kiristysvaiheessa, joten sitäkin tutkittiin FEM-simulaatiossa (Kuva 13) . Lopputuloksena holkkiin kohdistuva jännitys oli 108 Mpa, joka on varsin vähäistä.



Kuva 13. Kiinnitysholkin FEM-kuva kiristystilanteessa.

9 KORIIIN KIINNITTÄMINEN

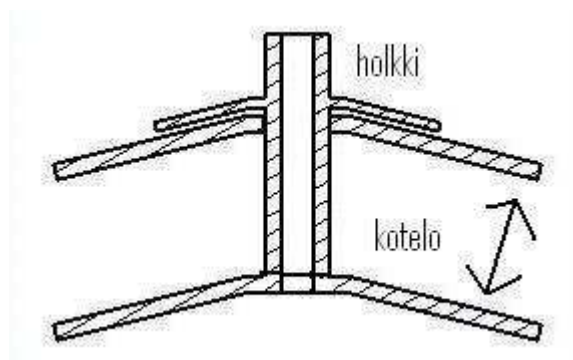
Auton kori on tehty mukailemaan apurunkoja jonka ansiosta apurunkojen kiinnittäminen koriin helpottui. Hyvän istuvuuden ansiosta myös alustaan kohdistuvat voimat siirtyvät hyvin koriin, mikä vähentää apurunkojen rasitusta. Apurungot kiinnitettiin koriin Sf355-teräksestä tehdyillä levykiinnikkeillä, sekä M6- ja M8-ruuveilla. Levykiinnikkeisiin puristettiin ruostumattomasta teräksestä tehtyt kierreniittimutterit, koska moottoreiden yläpuolelle ei mahtuisi kiristämään tavallista mutteria. Kierreniittien ansiosta säästettiin painossa kierteiden tekoon vaadittavaa materiaalipaksuuden verran. Kierreniittimutterin kierteen vetolujuudeksi valmistaja ilmoittaa 15 000 ja 27 000 newtonia . (ks. Liite 2)

9.1 Ruuviliitoksen asennusmomentti

Kierreniittimuttereiden valmistaja ilmoittaa asennusmomentiksi M6-kierteisiin 10 Nm ja M8 -kierteisiin 24 Nm (ks. liite 1). Tämä ehkä osaksi sen takia, että kierreniitit pyörähtävät helposti ruuvia asennettaessa. Niissä kohdissa, joissa kierreniittejä käytetään, asennusmomenttina käytetään valmistajan ilmoittamaa momenttia.

9.2 Kotelarakenteen hyödyntäminen kiinnityksissä

E-RAn hiilikuitumonokokissa on käytetty paljon kotelorakenteita. Monet apurungon kiinnityspulteista piti porata näiden koteloiden läpi. Kaikkiin koteloiden reikiin tehtiinkin alumiiniholkit estämään kotelon rikkoutumista pulttien kiristyksen aikana (Kuva 14).



Kuva 14. Kotelorakenteiden sisään tuleva holkki.

10 HAMMASTANKO JA KALLISTUKSENVAKAAJAT

Hammastankona E-RAssa toimii Audi R8n alun perin hydraulisesti tehostettu hammastanko, josta poistettiin hydrauliletkujen liitännät. Hammastanko kiinnittyy apurunkoon hammastangon omilla alumiinisilla kiinnikkeillä. Rattiakseli on tuettu apurunkoon Sf355-teräslevystä tehdyllä kiinnikkeellä. Rattiakselissa on jätetty tilanvaraus jälkikäteen lisättävälle sähköiselle ohjaustehostimelle, mutta autoa päätettiin kokeilla ilman ohjaustehostinta.

Hammastanko on kiinnitetty etuapurunkoon kolmesta kohdasta. Lujuuslaskennassa on oletettu ratin kääntövoimaksi 200 N, ratin halkaisijaksi 350 mm ja hammastangossa olevan hammaspyörän halkaisijaksi 20 mm. Hammastanko pyrkii siis liikkumaan vastakkaiseen suuntaan rattia käännettäessä seuraavanlaisesti.

$$R = \frac{350\text{mm}}{2} = 175\text{mm}$$

$$r = \frac{20\text{mm}}{2} = 10\text{mm}$$

$$F_1 = 200\text{N}$$

$$F_2 = x$$

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{R}{r} \Rightarrow F_2 = \frac{R}{r} * F_1 = \frac{175\text{mm}}{10\text{mm}} * 200\text{N} \approx 3500\text{N}$$

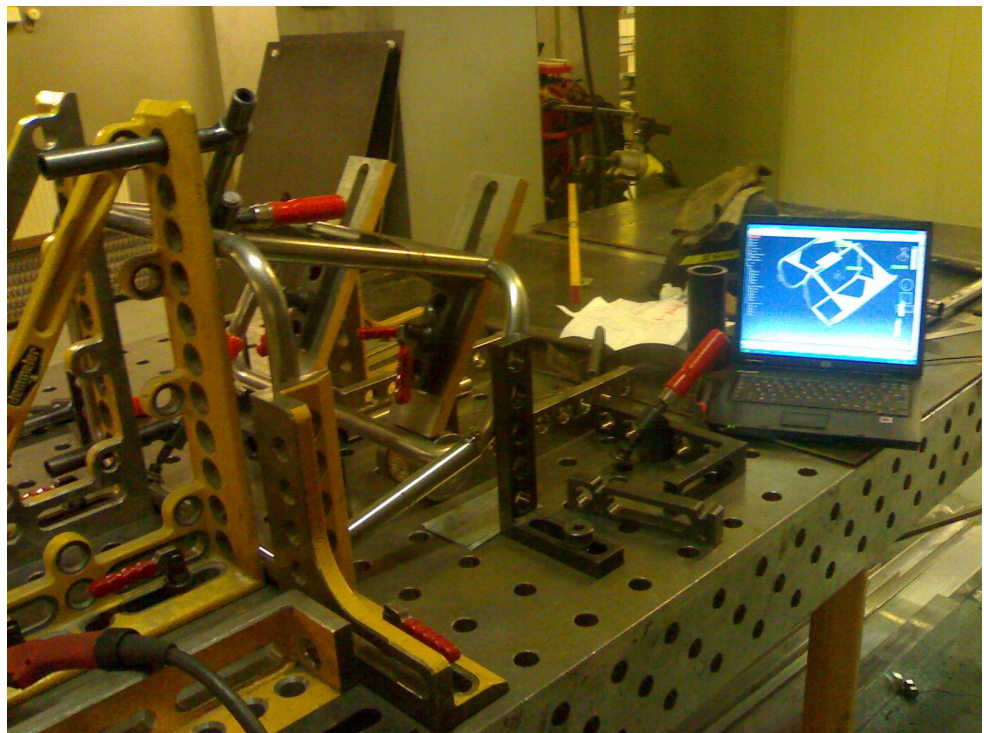
Jos oletetaan, että voimat jakautuvat tasaisesti, niin jokaista kaariputkea rasitetaan sivuttaissuunnassa siis 778 N voimalla. Kyseiset voimat ovat niin pieniä verrattuna tukivarsivoimiin, että ne on jätetty pois tietokoneella tehdystä lujuuslaskentasimulaatioista.

E-RA sisältää hyvin paljon uutta teknologiaa ja siksi suunnitteluvaiheessa auton lopullista massaa oli hyvin vaikea arvioida. Kallistuksenvakaajan mitoitust on hyvin riippuvainen auton massasta, painopisteen sijainnista sekä alustan jäykkyydestä. Tästä syystä suunnittelussa jätettiin kallistuksenvakaajat vielä pois ja autoa testataan ennen niiden suunnittelua.

11 VALMISTUS JA LAADUN TARKISTUS

Kaikki apurunkoon kohdistuneet kokoonpanotyöt tehtiin koulumme jigipöydällä, joka mahdollistaa varsin hyvään mittatarkkuuteen pääsemisen (Kuva 15). Apurunkojen kaariputket taivutettiin ja hitsattiin muotoon niille tehtyjen jigien avulla. Kaaria yhdistävät putket oli aluksi tarkoitus laserleikkauttaa, mutta tiukan aikataulun takia päätettiin työ tehdä käsin. Apuna leikkauksessa käytettiin Catia 3D -ohjelmasta saatavia 1:1-työpiirustuksia sekä tähän tarkoitukseen tarkoitettua muotokampaa.

Kaikkia pienahitsauksia varten saumat viistettiin, jotta hitsausaumasta saataisiin mahdollisimman kestävä. Tämän jälkeen rakennettiin jigi kehikoiden kokoamista ja tukivarsikiinnikkeiden aluslaattojen kiinnittämistä varten. Kaikki saumat hitsattiin pieneltä alueelta kiinni ja aloitettiin mittojen tarkastaminen. Mittatoleranssiksi ennen varsinaista hitsausta asetettiin 1 mm. Kyseessä on varsin luja teräsputki ja siksi mahdollisia hitsausvääntelyitä ei voinut jigien avulla täysin ehkäistä. Jokainen sauma hitsattiin $\frac{1}{4}$ kerrallaan ja ristitiin, niin että toisen puolen sauma vetäisi aina edellisen puolen väännön takaisin. Tässä onnistuttiin hyvin, mutta hieman lämpövääntelyitä apurungoissa on havaittavissa.



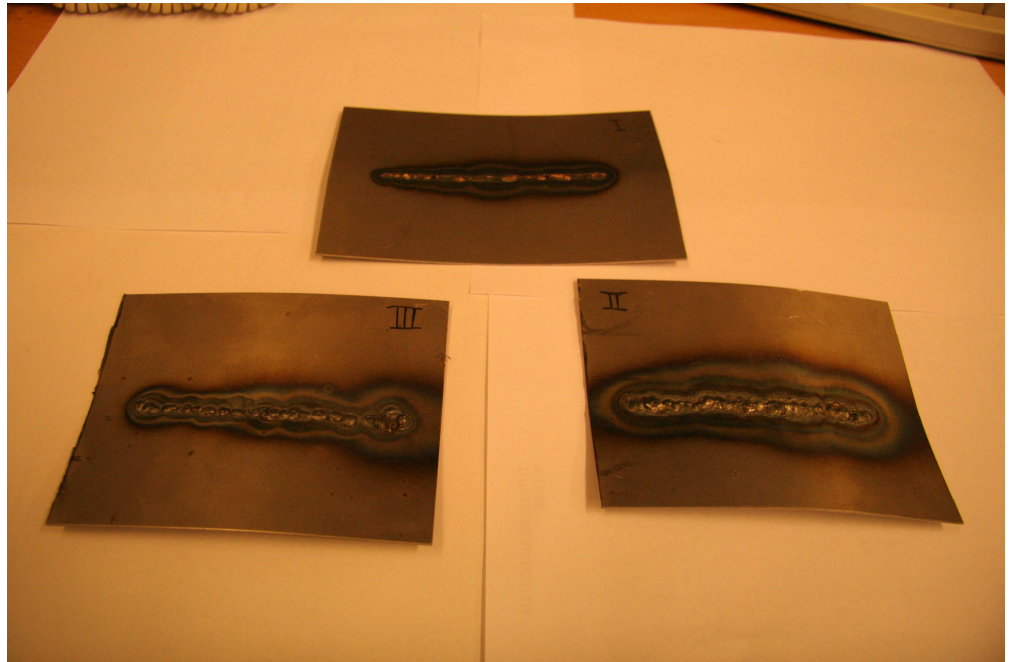
Kuva 15. Apurungon kasausta jigipöydällä Catia 3D -ohjelman avulla.

Moottorin kiinnikkeet valmistettiin 20 * 20 * 1,5 mm neliöputkesta, materiaalitetaan form 800 -putkea. Putkeen sorvattiin ja hitsattiin moottorin kiinnityspulttien kohdalle holkit estämään putken kasaan painumista kiinnitysvaiheessa.

11.1 Levyjäykisteiden hitsaus

Alatukivarsien kiinnikkeiden taakse hitsattavat levyjäykisteet hitsattiin vastasen jälkeen, kun tukivarsikiinnikkeet olivat jo paikoillaan. Lämpövääntelyitä piti siis välttää kaikin mahdollisin tavoin. TIG-hitsauksella saadaan saumasta usein parempi ja siistimpi kuin MAG-hitsauksella, mutta TIG-hitsauksessa totesimme kappaleen lämpenevän enemmän. Yksi tapa ehkäistä lämpövääntelyjä on käyttää hitsausmenetelmänä kaarijuottoa. Kaarijuotossa hitsauslisäaineena käytetään messinkiseosta ja sillä tavoin hitsauslämpötila voidaan pitää alhaisempana. Kaarijuotossa itse kappaletta ei sulateta kuten TIG- ja MAG-hitsauksessa. Se, että kappale itsessään ei sula heikentää osittain hitsausseaman kestoa, varsinkin staattista lujuutta, sillä sauman kestävyys jää täysin lisäaineen varaan.

Tutkimme eroja lämpövääntelyissä eri hitsausmenetelmien välillä. Kuva 16 esittää kaikkien kolmen eri menetelmän lämpövääntely. Hitsattavat koelevyt ovat S355 -terästä ja paksuudeltaan 1,5millimetriä. Koelevyihin oli ajettu noin 50 millimetrin pituiset railot, jotka sitten hitsattiin umpeen. Testaukseen ja arvojen säätöön käytettiin kaikissa kolmessa tapauksessa useita koelevyjä, jotta taidon puute ei vaikuttaisi tulokseen. Kuvasta ei välttämättä näe selvästi, mutta TIG-sauma (Kuva 16, nro 2) tosiaan aiheutti selvästi eniten vääntöä levyssä. Sen sijaan MAG-sauma ja kaarijuoton sauma aiheuttivat hyvin samanlaisen muodonmuutoksen levyihin. Koska kaarijuotto on kestävyiden kannalta huono menetelmä, oli selvää, että hitsauksessa käytettäisiin MAG -hitsausmenetelmää.



Kuva 16. Hitsauskokeita lämpölaajenemisen tutkimiseen.

11.2 Hitsaussaumojen tarkistus

Hitsauksen jälkeen päätettiin tarkastaa, ettei saumoihin ole jäänyt halkeamia. Kun kaariputket oli saatu hitsattu kokoon hitsaussauma hiottiin taiseksi. Hionta tehtiin sen takia, ettei putken pinnan ja hitsaussauman rajapintaan tulisi turhaan jännityksiä. Kaikki hiotut saumat tarkastettiin ennen apurunkojen maalausta. Tarkastus tehtiin siten, että ensin sauma maalattiin tähän tarkoitukseen tehdyllä maalilla (Kuva 17). Sen jälkeen sauman päälle ruiskutettiin magneettista tunkeumanestettä. Lopuksi putken ympärille laitettiin sähköllä toimiva magneettihaarukka. Putki siis varattiin magneettisesti sauman kohdalta. Valkoinen maali auttaa havaitsemaan, kun tumma neste imeytyy saumassa olevaan halkeamaan. Onneksi kaikki hitsaussaumat oli tehty niin, että korjauksia ei tarvittu enää tässä vaiheessa tehdä.



Kuva 17. Hitsauksessa syntyvien halkeamien etsimistä.

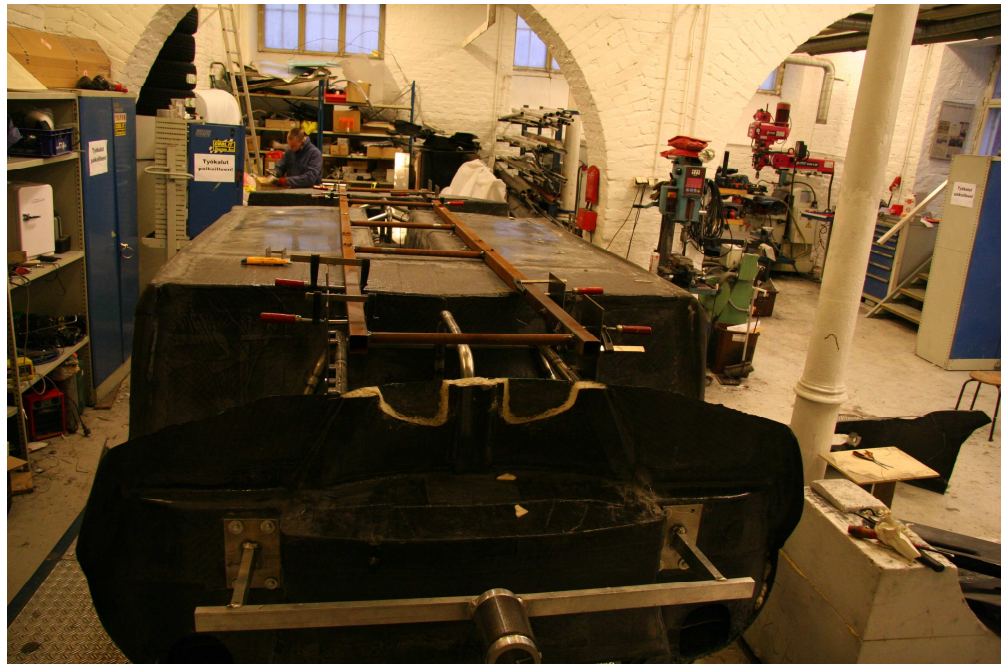
12 SIOITTAMINEN AUTOON

Auton kori on mallinnettu apurunkojen ympärille siten, että korin on tarkoitus tukea apurunkoja mahdollisimman laajalta alueelta. Auton kori on tehty ns. yksipuoleisilla muoteilla eli muotin päälle asetettiin hiilikuitu ja sen päälle alipainekalvo. Tässä menetelmässä haittapuolena on se, että toinen pinta kappaleesta jää harvoin tasapaksuksi, koska alipainekalvo venyy ja siihen tulee ryppyjä. Epätasaisuuden takia apurunkojen ja korin väliin jouduttiin jättämään hieman rakoa. Kun apurungot oli saatu kohdistettua oikeille paikoilleen, väliin jäävä tila täytettiin hiilikuidusta, mikropalloista ja epoksista valmistetulla täyttöaineella. Tällä varmistettiin myös se, että apurungot istuvat oikealle paikoilleen myös maalauksen jälkeen.

12.1 Alustava kohdistaminen

Apurungot saatiin valmistettua hyvinkin tarkkoilla mittatoleransseilla ($\pm 1\text{mm}$) ja se helpotti niiden sijoittamista autoon. Koska hiilikuitumonokokki on tehty yli 20:stä eri osasta on selvää, että korissa oleviin pisteisiin ei voitu sokeasti luottaa. Apurungot on linjattu toisiinsa nähden ja kori on ikään kuin laskettu niiden päälle. Asiaa helpottamaan käänsimme korin ylösalaisin koripukin vaaraan.

Aloitimme linjauksen tekemällä teräksisen tikapuurunkoa muistuttavan jigin. Jigi valmistettiin oppilaitoksen jigipöydällä, jotta sen mittatarkkuus ei aiheuttaisi mittavirheitä itse linjauksessa. Apurungoista poistettiin alatukivarsien kiinnikkeet ja niiden paikalle laitettiin 5mm paksut teräslevyt. Takapäähän sorvattiin vielä neljä holkkia mittapaloiksi, koska etupään apurunko on kaapeampi. Etupään apurunko istutettiin autoon nähden paikalleen ja takaapurunko linjattiin etupään mukaan (Kuva 18). Näin apurungot saatiin auton leveyssuunnassa linjattua.



Kuva 18. Akselistojen linjausta itse tehdyn jiggin avulla.

Pituus- ja korkeussuunnassa apurungot linjattiin vesivaakojen avulla. Analoginen vesivaaka ei ole kovin tarkka mittalaite autokäytössä, mutta alustavaan linjaukseen se sopi varsin hyvin, kuten varsinaiset mittaustulokset myöhemmin kertovat.

12.2 Kohdistusta Hunter -pyöräntulma mittalaitteen avulla.

Kun alustava kohdistus oli tehty laitettiin auto ensimmäistä kertaa pyörilleen. Tässä vaiheessa korikiinnikkeet olivat vasta pistehitsattuina apurunkoihin kiinni, jotta niitä olisi mahdollista muuttaa tarvittaessa. Korin kasaamisessa käytetyn mittavarren pituus ei riittänyt apurunkojen välimatkan mittaamiseen, joten käytimme Hunter -pyöräntulmamittaria. Kyseessä on yleisesti käytössä oleva laite, jonka mittatarkkuus riittää pyöräntulmien mittaamiseen. Varsinaisia pyöräntulmia ei tässä vaiheessa ollut tarkoitus mitata, vaan katsoa laitteesta löytyvien lisämittaustoimintojen avulla akselistojen suuntia toisiinsa nähden. Laite ei varsinaisesti ole tähän käyttöön tarkoitettu, mutta sen avulla pystyimme toteamaan alustavan linjauksen onnistuneen.

12.3 Lopullinen kohdistus Caroliner-mittalaitteella.

Varsinainen kohdistus tehtiin Rajamäen TTS:n aikuiskoulutuskeskuksessa olevan Caroliner-alustamittauslaitteen avulla (Kuva 19). Caroliner-mittauslaitetta käytetään normaalisti kolariautojen mittaamiseen. Itse mittalaite on kiskoilla liikkuva mittavarsi, johon voidaan liittää eri pituisia jatkovarsia sekä erilaisia mittapäitä. Laite itse tunnistaa, minkä pituinen jatkovarsi on käytössä, ja ottaa sen huomioon tuloksessa. Mittapäinä käytetään yleisesti muovisia hylsyä muistuttavia holkkeja, jotka istuvat ruuvinkantoihin todella tarkasti.

Caroliner-mittalaitteesta löytyy todella kattavasti eri automallien mittakortteja, joiden avulla mittalaite on helppo kalibroida. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että ohjelma kertoo autossa olevan ruuvien paikan ja kannan koon, johon mittalaite tulee viedä. Kun tarpeeksi monta pistettä on haettu laite on kalibroitu kyseistä autoa varten. E-RAn tapauksessa ei tietenkään tällaista valmista korttia ollut olemassa, joten jouduimme hakemaan symmetrisiä pisteitä auton keskilinjan molemmiin puoliin mittalaitteen kalibroimiseksi. Kun kalibrointi oli tehty, laite teki mittausten perusteella keskilinjan. (ks. Liite 3).

Alkuperäinen suunnitelma oli käyttää muutama päivä apurunkojen kohdistamiseen TTS:n tiloissa siten, että mittalaite olisi koko ajan käytössä ja apurunkoja liikutettaisiin mittaustuloksien mukaan. Ensimmäisen mittauksen jälkeen totesimme akselin siirtämisen turhaksi, koska mittaustulokset menivät heti henkilöautojen korjauksissa annettujen rajojen sisäpuolelle. Pitkittäis- ja poikittaismoitoissa suurin ero oli 3 mm ja ristimitassa (ns. Avaruuslävistäjässä) ero oli 5 mm. Apurunkojen siirtäminen näiden erojen poistamiseksi ei ollut järkevää, koska korista olisi jouduttu poistamaan materiaalia ja ero saatiin kompensoitua säädettävien tukivarsikiinnikkeiden avulla. Lisäksi on muistettava, että tehtailla robottien valmistamisessa autoissa on useiden millimetrien toleranssi.



Kuva 19. Alustan kohdistusta TTS: n tiloissa Caroliner -mittalaitteen avulla.

13 TUOTANNOLLISTAMINEN

13.1 Progressive Automotive X-PRIZE

E-RAn suunnittelussa on alusta asti painotettu kahta asiaa. Tarkoituksena on ollut rakentaa loistava sähköurheiluauto sekä auto, jolla osallistutaan Yhdysvalloissa järjestettävään Progressive Insurance of Automotive X PRIZE (lyh. PIAX) -kilpailuun. PIAX on X PRIZE Foundationin järjestämä kilpailu, jonka tarkoituksena on kannustaa ympäristöystävällistä autoilua. Kyseessä ei kuitenkaan ole prototyyppiautojen kilpailu, vaan jokaisen auton tulee olla hyvinkin tuotantovalmis, turvallinen, haluttava sekä järkevän hintainen. Lisäksi jokaisen auton tulee täyttää kilpailun varsin tiukat säännöt. Käytännössä sääntöjen täyttäminen tarkoittaa sitä, että auton tulee olla pieniä poikkeuksia lukuun ottamatta tieliikennehyväksytty Yhdysvalloissa.

Suurin haaste E-RAn suunnittelussa kilpailun sääntöjen täyttämiseen on varmasti ollut tuotantosuunnitelman tekeminen. PIAX-sääntöjen vaatiman tuotantosuunnitelman tulee olla suunniteltu 10 000 auton vuosituotantoon. Hiilikuitu on materiaalina kallista ja vaatii ainakin vielä paljon ihmistyövoimaa, joten sen käyttäminen tämän mittakaavan sarjatuotannossa ei ollut mahdollista. E-RAn ”tuotantoversion” onkin suunniteltu olevan alumiinikori, mutta muuten vastaavan hyvin paljon ensimmäistä prototyyppiä. Ajatus alumiiniin siirtymiseen tuli siitä, että nykypäivän materiaali tekniikalla saadaan alumiinikori huomattavasti kevyemmäksi kuin vastaavan kokoinen teräskori tinkimättä lujuudesta. Alumiinilla ei kuitenkaan päästä lähellekään hiilikuitua paino-lujuus -suhteessa, mutta alumiini on paljon sarjatuotantovalmiimpi materiaalina.

Tätä työtä tehdessä on kuitenkin pidetty silmällä hiilikuiturunkoisen E-RAn saamista piensarjatuotantoon kyseisillä apurungoilla.

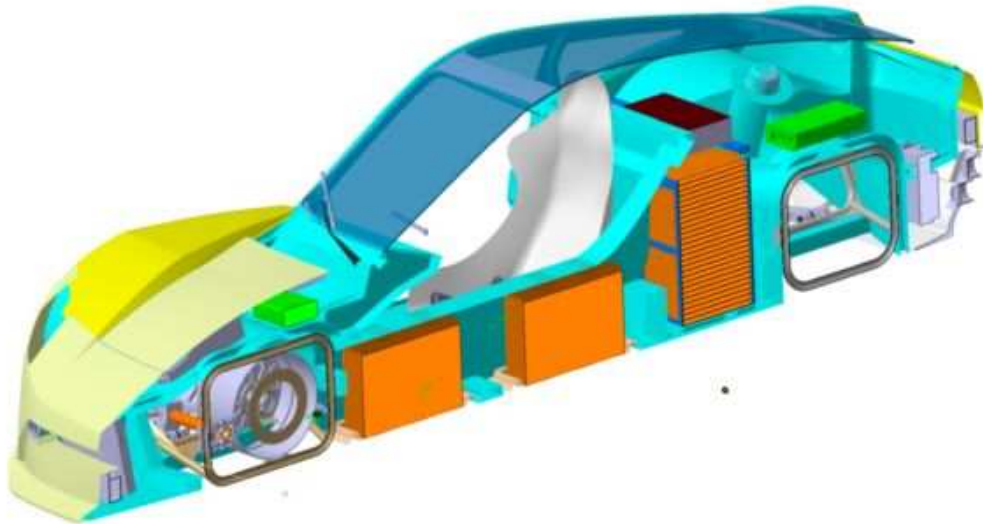
13.2 Piensarjatuotanto

Sanalla piensarjatuotanto tarkoitetaan tässä työssä noin sadan auton vuosi-
vauhdilla toimivaa tuotantoa. Ajatus piensarjatuotannosta tulee siitä, että op-
pilaitoksen aikaisemmat prototyyppi-autot ovat herättäneet suurta kiinnostus-
ta eri valmistajien ja yritysten taholla ympäri maailmaa. Opetuslaitoksena
Metropolia (aiemmin Stadia) on aina ollut etuoikeutettu tuotekehityksessä
tarvittavien ohjelmistojen hankkimisen suhteen. Opiskelijalisenssit ovat
huomattavasti huokeampia verrattuna teollisuudessa käytettävien lisenssien
hintaan. Lisäksi nykyaikaisten CAD, CAM, FEM ja CFD -ohjelmien koulutta-
minen maksaa yrityksille kohtuuttoman paljon. Opiskelijaprojektina tuoteke-
hitysprojektin läpivieminen on sekä taloudellisesti, että opetuksellisesti kan-
nattavaa. Kokemattomien tuotekehityssinsinöörien vuoksi ei ole realistista, et-
tä E-RAn tyyppinen urheiluauto olisi millään tasolla sarjatuotantovalmis, mut-
ta erittäin hyvä pohjatyö sarjatuotannon suunnittelulle prototyypin rakennuk-
sesta on saatu.

E-RAn hiilikuitumonokokin muotit on tehty jyrsimällä styroksin päälle levitet-
tyä pastaa. Menetelmä on paljon käytetty mm. veneteollisuudessa, mutta sil-
lä erolla, että yleensä jyrsitään malli eli lesti. Lestin avulla tehdään esimer-
kiksi lasikuidusta varsinainen muotti. Tällä tavoin koneistustarve saadaan
pienemmäksi ja itse muotit kestävämmäksi. E-RAn tapauksessa kyseinen
menetelmä ei olisi ollut työmäärän kannalta järkevää, koska pelkästään raa-
kakori muodostuu yli 20:stä eri osasta. Pintapaneelien ja sisustan kanssa
muottien lukumäärä on liki 50 kpl. E-RAn muotit soveltuvat hyvin muutaman
auton valmistukseen, mutta ei sarjatuotantoon. E-RAn sisustassa käytettiin
muottimateriaalina ns. pastablokkia eli 200 mm paksua erikoismuovilevyä.
Kokeilujen perusteella kyseistä materiaalia käyttämällä muotit soveltuisivat
jopa sarjatuotantoon. Kustannukset toki nousevat käytettäessä pastablokkia,
mutta materiaalina se on silti paljon halvempaa kuin käytettäessä muottima-
teriaalina yleisesti sarjatuotannossa käytettyä alumiinia.

Urheiluautoissa on hyvin yleinen ratkaisu käyttää hiilikuitumonokokkia ja etu-
ja taka-apurunkoja. Rakenteeltaan tällaisia autoja ovat esimerkiksi Koenni-
segg CCX ja Pagani Zonda R. E-RAn hiilikuitumonokokki eroaa muista siinä,
että monokokki ylettyy ns. etu- ja takatörmäysvyöhykkeille (Engl. Crashzo-
ne). Monokokin pituus helpottaa paljon apurunkojen suunnittelua, koska mo-

monokokki tukee apurunkoja lähes kauttaaltaan ja mahdolliset keula-, sekä peräkolarit kohdistuvat ensin monokokkiin, eikä apurunkoihin (kuva. 20) Myös korin kiertöjäykkyys ja törmäysturvallisuus ovat etuna E-RAn tyypisessä pitkässä monokokissa.



Kuva 20. Halkileikatun korin CAD-malli.

14 YHTEENVETO

Tämä opinnäytetyö on ollut lähes täysin auton suunnittelussa tehtyjen laskujen ja suunnitelmien kirjaamista. Edellä mainittuja laskelmia ja simulointia on käytetty E-RAn suunnittelun perustana. Olisin halunnut sisällyttää tähän työhön myös moottoriradalle tehtävät venymäliuskamittaukset, jossa auton alustaa kuormitettaisiin mahdollisimman paljon venymäliuskojen ollessa kiinnitettynä apurunkoihin ja tukivarsiin. Tämä tullaan varmasti tekemään myöhemmässä vaiheessa, mutta tähän työhön se ei aikataulullisesti kerinnyt.

E-RAn apurungot on erilaiset edessä ja takana. Syy apurunkojen eroon johdettu alustageometrian suunnittelusta. Ennen apurunkojen mitoittamista auton haluttu alustageometria suunniteltiin Susprog 3D -ohjelman avulla ja siinä määritetyt tukivarsien kiinnityspisteet määrsivät apurunkojen mitat. Tukivarsien kiinnitys voitaisiin tosin helposti muuttaa yksinkertaisemmaksi ja siten myös sarjatuotantoystävälliseksi. Tällä hetkellä pyöreiden putkien ja Audin kiinnikkeiden väliin on jouduttu tekemään erilliset välikappaleet, mutta jatkossa voitaisiin siirtyä kahden osan sijasta yhteen osaan. Ennen sitä autolla olisi hyvä tehdä edellä mainitut venymäliuskamittaukset, jotta osien kestävyys ei kärsisi painonsäästön takia.

Suunnittelun alkuvaiheessa tavoitteeksi asetettiin, että apurungot ja hiilikuitumonokokki voitaisiin sarjatuotannossa valmistaa eri paikoissa ja liittää vasta kokoonpanotehtaalla yhteen. Tämä tavoite on mielestäni toteutunut, sillä apurungot saa irrotettua korista vain ruuvien avaamalla. Apurungot voidaan laskea ja nostaa paikalleen jopa pyörät kiinnitettynä (Kuva 21).



Kuva 21. Apurunkojen irrotus korin ja alustanosien maalausta varten.

Mielestäni suurin ongelma tämän työn toteuttamisessa on ollut aikataulu, jossa apurungot suunniteltiin ja valmistettiin. Auton suunnittelun alkuvaiheessa auton lopullista massaa oli mahdoton arvioida, sillä suurin osa korkeajännite tekniikasta oli vielä valitsematta. Kuten tässä työssä esiintyvistä kaavoista käy ilmi, auton massalla on suuri merkitys rakenteita kuormittaviin voimiin. Kunnianhimoinen tavoitteemme oli alun perin saada auton massa pysymään alle 1200kg:ssa. Keväällä 2010 ennen kuin auto lastattiin laivaan X PRIZE kilpailua varten massa oli jo 1720 kg. Massa muodostuu siten, että autossa oleva korkeajännitetekniikka painaa yli 1000 kg! Tulevaisuudessa auton kehittäminen nopeaksi urheiluautoksi vaatii siis paljon lisää panostusta kaapeleiden ja erilaisten sähkölaitteiden optimoinnissa. Toki myös muilla osa-alueilla riittää varmasti vielä parannettavaa.

Tämän opinnäytetyön laskuissa auton massana on käytetty siis 1400 kg. Todellisuudessa kuljettajan kanssa E-RA painaa noin 1800 kg ja se tosiaan vaikuttaa alustassa tapahtuviin rasituksiin. Onneksi vertailukohtana ollut Audi R8 on hyvin samanpainoinen E-RAn kanssa ja tukivarsien yms. voidaan olettaa kestävän myös nykyisen massan kanssa. Apurungot taas joutuvat varmasti kovalle, kun autoa rasitetaan rata-ajossa ja siksi rasitustasoa tulee nostaa asteittain. Ennen auton lastausta laivaan keväällä 2010 lyhyt testauskausi osoitti, että E-RA kestää normaalia ajoa, sekä jarrutusta 3,5kN:n voimalla per pyörä jarrudynamometrissä. Meidän tapauksessa 3,5kN:n jarru-

tusvoima riittää X PRIZE -kilpailussa vaadittavaan 0,7 g:n hidastuvuuteen. X PRIZE -kilpailussa vaadittava sivuittaaskiihtyvyys vakioympyräradalla on niin ikään 0,7 g, jonka E-RA kestää myös nykyisellä massalla. Nähtäväksi jää, kuinka pitkälle autoa pitää rasittaa, ennekuin saadaan murtumia alustarakenteisiin.

Loppujen lopuksi olen tyytyväinen siihen, että E-RA on toimiva sähköurheiluauto jolla on mukava ajaa (Kuva 22) . Kesällä 2010 järjestettävä X PRIZE kilpailu varmasti näyttää, kuinka kilpailukykyinen auto E-RA on tulevaisuuden sähköautomarkkinoilla ja onko siitä muiden kilpailijoiden päihittämiseen. Vaikka X PRIZE kilpailusta ei voittoa tulisi, on projekti mielestäni silti erittäin onnistunut.



Kuva 22. E-RA Kampissa sijaitsevalla sähköautojen latauspisteellä.

VIITELUETTELO

- [1] Airila Mauri ym. *Koneenosien suunnittelu*. Porvoo: Ws Bookwell Oy. 2003.
- [2] Milliken William F - Milliken Douglas F, *Race car vehicle dynamics*. SAE International.1997.
- [3] Gillespie Thomas D, *Fundamentals of vehicle dynamics*. SAE International. 1992.
- [4] Audi R8 suoritusarvot. [verkkodokumentti]. 9.3.2007 [viitattu 12.3.2009].
Saataavissa: <http://www.insideline.com/porsche/911/2007/comparison-test-2008-audi-r8-vs-2007-porsche-911-turbo.html>

LIITTEET

RIVKLE® – asennusohjeita**Ruuvien valinta**

RIVKLE®-sisäkierteet ovat ISO 68 standardin 6H mukaisia.
Niihin sopivat useimmat ruuvit, parhaiten yleisesti hyväksytty toleranssi 6g.

RIVKLE®-kierreniittimutterien ja –ruuvien kiristysmomentti

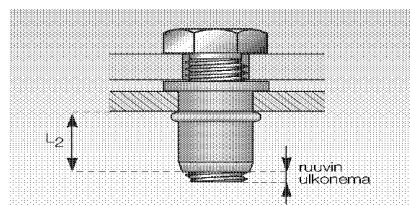
RIVKLE®-kierteeseen sopivat kaiken tyypiset ruuvit edellyttäen että käytetään korkeintaan allamainittuja maksimi-momentteja (Nm).

RIVKLE®-koko	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12
Teräs/ruostumaton teräs	1,2	3	6	10	24	48	82
Alumiini	0,7	2	4	6	15	27	45

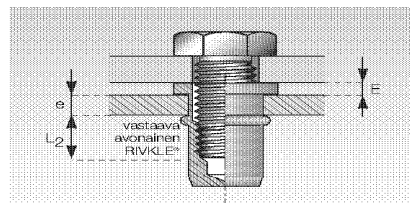
Huom: Teräksisen ja ruostumattoman RIVKLE®n koot M3–M10: nämä momentit vastaavat ruuvien lujuus-luokkaa 8.8.

Ruuvien pituus

- ☞ **Avonaisessa RIVKLE®-niitissä** ruuvien on oltava vähintään yhden kierteen verran pidempi kuin tystetty pituus (L_2).

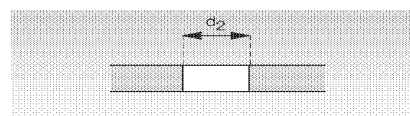


- ☞ **Umpinaisessa RIVKLE®-niitissä** maksimiruuvussyvyyden (P) määrittämiseksi on ensin selvitettävä vastaavan avonaisen RIVKLE®n pituus L_2 . Siis $P_{\max} = L_2 + e + E$.

**Kiinnitettävän osan reikä**

Kiinnitettävään osaan suositellaan asennusreiän kooksi (d_2) ruuvien halkaisija x 1,1.

Jos samaan kappaleeseen asennetaan monta uppo- tai tasakantaista RIVKLE®-ä, tätä mitta on suurennettava vastaamaan toleranssia.



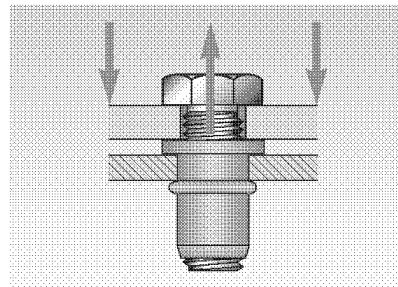
RIVKLE® – asennusohjeita**Ruuvin voitelu**

Jos ruuvi joudutaan avaamaan usein, ja varsinkin jos tuote on ruostumatonta terästä, ruuvi on ensimmäistä kertaa kiinnitettäessä syytä voidella.

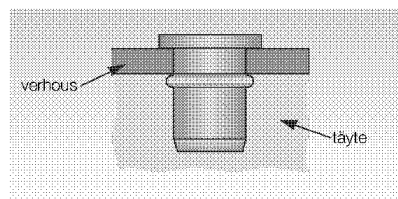
RIVKLE®-sisä- ja ulkokierteiden mekaaniset ominaisuudet☒ **Kuormitus vetokokeessa**

Koko	RIVKLE® teräs ja ruostumaton	RIVKLE® alumiini	Kierreniitti- ruuvi, teräs
M3	4 000	2 500	/
M4	6 800	4 000	/
M5	10 000	5 500	8 100
M6	15 000	8 300	11 500
M8	27 000	13 000	21 000
M10	37 000	20 000	/
M12	54 000	28 000	/

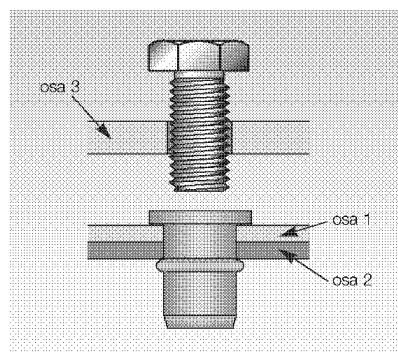
Yksikkö: Newton

☒ **Käyttölämpötila** -30 à +80°C.**Erikoissovelluksia**☒ **Väliseinät**

RIVKLE® voidaan asentaa 'sokkona' seinän ulkoverhouksen läpi täytteeseen.

☒ **Niittaus**

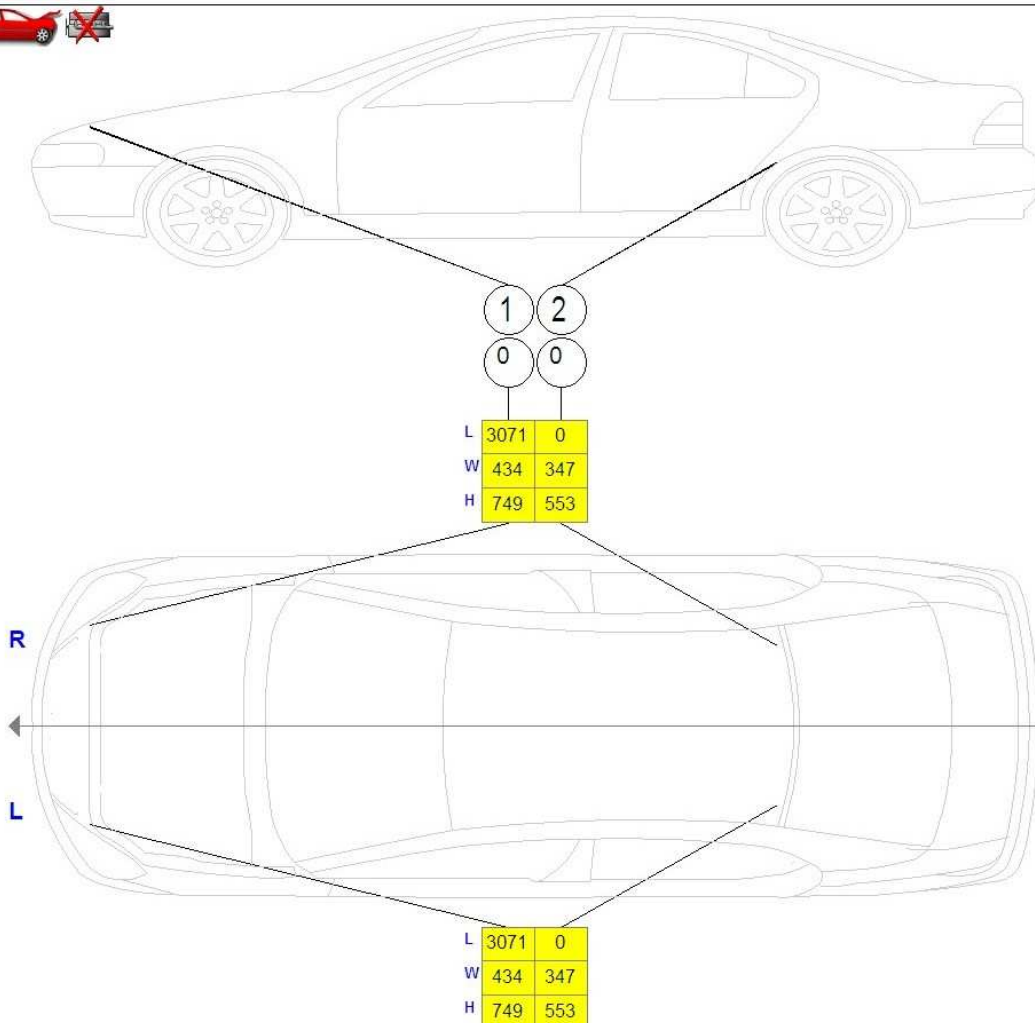
Paitsi ruuvien ankkurina RIVKLE®-niittimutteria voidaan käyttää niittaamaan kaksi osaa yhteen ja muodostamaan asennuskierteen kolmannelle osalle.



Car-O-Soft Vision X3 Report

Car-O-Soft Vision X3 V. 4.12
2009-02-16

Asiakas		Auto	
Nimi		Mittakortti 123:001	Julkaisu 2003-02
Osoitteet		Valmistaja _CAROLINER	
Kaupunki	Postinro	Malli Empty data sheet	Tyyppi _
Kunta	Puhelin	Vuosi 2000 -	Alustanro
Sähköposti		Rek.nro	Km
Vak.yhtiö		JOB	
Vakuutusyhtiö	Hakemus nro	Työmääräin METROPOLIA2	Alkaen: 2009-02-16
Mittaaja	Puhelin	Asentaja	Saakka: 2009-02-16
Sähköposti		Allekirjoitus _____	



Korjaamo

Yritys TTS Education / Car Body Academy
Osoitteet Kiljavantie 6
Kaupunki Rajamäki Postinro 05201
Kunta Finland Puhelin 358(0)929041200
Sähköposti kari.kaaja@tts.fi

Huomautukset

• **Kemiallinen koostumus**

Taulukko 2

	Pitoisuus paino-%, enintään		
	C	Si	Mn
Form 500 C	0,10	0,25	1,20
Form 500 H	0,10	0,03	1,10
Form 500 Z	0,12	0,50	1,50
Form 600 C	0,15	0,50	1,10
Form 600 Z	0,17	0,40	1,70
Form 800 C	0,15	0,30	1,60
Form 800 H	0,15	0,60	2,10
Form 800 Z	0,20	0,50	2,00
Form 1000 C	0,18	0,60	1,60
Form 1000 Z	0,20	0,50	2,00

• **Mekaaniset ominaisuudet, takuuarvot**

Taulukko 1

	Myötölujuus	Murtolujuus	Murtovenymä
	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A ₅ %
Form 500 C, H, Z	min. 400	min. 500	min. 10
Form 600 C, Z	min. 500	min. 600	C: min. 15, Z: min. 12
Form 800 C, H, Z	min. 600	min. 800	C, H: min. 10, Z: min. 7
Form 1000 C, Z	min. 750	min. 1000	min. 5

Automotive Steel Sheets from Rautaruukki

Cold Rolled	Thickness range	R _e range MPa	R _m min MPa	A ₈₀ min %
Formable Steels				
RACOLD 06F	0.5-2.0	<180	270-350	38
High Strength Formable Steels				
RACOLD 240 HSF	0.4-3.0	240-310	340	27
RACOLD 280 HSF	0.4-3.0	280-360	370	24
RACOLD 320 HSF	0.7-3.0	320-410	400	22
RACOLD 360 HSF	0.7-3.0	360-460	430	20
RACOLD 400 HSF	0.6-3.0	400-500	460	18

Hot Dip Galvanised	Thickness range	R _e range MPa	R _m min MPa	A ₈₀ min %
Formable Steels				
RAGAL 54 F	0.6-2.5	140-220	270-350	36
RAGAL 56 F	0.6-2.0	120-180	270-350	39
High Strength Formable Steels				
RAGAL 260 HSF	0.45-3.0	260-330	350-430	26
RAGAL 300 HSF	0.50-3.0	300-380	380-480	23
RAGAL 340 HSF	0.50-3.0	340-420	410-510	21
RAGAL 380 HSF	0.50-3.0	380-480	440-560	19
RAGAL 420 HSF	0.80-3.0	420-520	470-590	17
LITEC RAGAL - dual phase steels / mechanical properties (Z and ZA)				
LITEC RAGAL 500 DPF	0.70-1.60	min 270	min 500	22
LITEC RAGAL 600 DPF	0.70-2.25	350	600	18
LITEC RAGAL 700 DPF	0.80-2.25	400	700	14
LITEC RAGAL 800 DPF	0.80-2.25	500	800	10
LITEC RAGAL 900 DPF	0.90-2.25	600	900	8
LITEC RAGAL 1000 DPF*	0.90-1.60	700	1000	6
* under development				
Other thicknesses negotiable				
Development work in progress				
<i>Phosphorous alloyed IF steels</i>				
RAGAL 220 YD				
RAGAL 260 YD				
<i>Solid solution strengthened low carbon steels</i>				
RAGAL 220 TP				
RAGAL 260 TP				
RAGAL 300 TP				